



**Joana Margarida  
Ferreira Lopes de  
Figueiredo**

**Sensores de fibra óptica para uso avançado em  
compósitos poliméricos**



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2009

**Joana Margarida  
Ferreira Lopes de  
Figueiredo**

**Sensores de fibra óptica para uso avançado em  
compósitos poliméricos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor João de Lemos Pinto, Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

*Aos meus pais.*

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Manuel Almeida Valente**

professor associado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor José Maria Longras Figueiredo**

professor auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade do Algarve

**Prof. Doutor João de Lemos Pinto**

professor catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço professor Doutor João de Lemos Pinto por me ter dado esta oportunidade de trabalhar no ramo da óptica que tanta satisfação e motivação me tem dado.

Agradeço a Hugo Lima, Nélia Alberto, Fátima Domingues, Paulo Antunes e Carlos Marques todas as sugestões, ajuda prestada, conhecimentos transmitidos e redes fornecidas durante a realização desta dissertação.

Um agradecimento muito especial à Lúcia, que sempre me acompanhou ao longo deste projecto, pela preciosa ajuda, pela sua disponibilidade e pelos seus conselhos.

A todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, nomeadamente ao Ferrie van Hattum, Franziska Regel, Ricardo Macedo e o Luís Oliveira do PIEP, pelo apoio na concretização do compósito necessário par este estudo. Agradeço também ao Doutor Filipe Teixeira-Dias, que prescindiu do seu tempo para debater comigo algumas questões relacionadas com o tema desta dissertação, à Gabriela Vincze, pela ajuda prestada na realização dos ensaios de tracção, e ao Doutor Alfredo Morais, pela disponibilidade demonstrada.

Um especial agradecimento a todos os meus amigos que sempre me apoiaram nas horas mais complicadas do meu percurso académico e que contribuíram para o meu crescimento pessoal, particularmente a João Sousa, Mário Oliveira, Cátia Alves, Teresa Moura, André Martins, Carlos Santos, Luís Ferreira, Bruno Ferreira e Edson Clemente. Aos colegas de curso, agradeço a partilha de conhecimentos e ideias que contribuíram para o meu crescimento pessoal e intelectual.

Por fim, agradeço e dedico 100% deste trabalho aos meus pais e irmãos, Martocas e Necas, que sempre deram o seu melhor para me apoiarem e incentivarem ao longo do meu percurso académico.

A todos vocês,

Muito Obrigada!

## palavras-chave

Sensores, fibra óptica polimérica, redes de Bragg, compósitos poliméricos, monitorização estrutural.

## resumo

Estruturas compósitas vulgarmente utilizadas em engenharia têm vindo a requerer monitorização estrutural adequada, tendo em vista a avaliação da fiabilidade e durabilidade da estrutura e garantir a segurança de utilização. Têm ainda vindo a evoluir para sistemas leves, compactos e de baixo custo com controlo dos diversos parâmetros inerentes à detecção de possíveis danos estruturais.

Esta dissertação centra-se no estudo relativo ao embebimento de sensores de fibras ópticas num compósito com fibra de carbono de reforço processado por VARTM – *Vaccum Assisted Resin Tranfer Moulding*. A integração de sensores de redes de Bragg em fibra óptica e de fibras ópticas poliméricas no compósito, possibilitou a monitorização, em tempo real, do processo de produção do referido compósito, permitindo acompanhar a cura da resina de epóxido ao longo do tempo e determinar a sua velocidade de infusão. Uma vez que a existência de tensões residuais pode ser prejudicial ao desempenho mecânico do compósito, realizou-se um tratamento térmico (pós-cura) de acordo com as informações apresentadas pelos fornecedores da resina.

De forma a analisar a resposta mecânica da estrutura compósita efectuaram-se ensaios flexurais em três pontos do espécime, levando alguns à fractura. Com este estudo foi possível avaliar a influência das fibras ópticas no comportamento mecânico da estrutura. A repetibilidade do processo e a boa recuperação dos sensores à deformação sofrida pelos espécimes foi verificada através da realização de ciclos de ensaios. Através do ensaio de tracção efectuado a um espécime sem fibras embebidas foi possível conferir a influência da orientação da malha de reforço de carbono no valor do módulo de elasticidade do material compósito.

**keywords**

Sensors, polymeric optical fiber, Bragg gratings, polymeric composites, structural monitoring.

**abstract**

Composite structures, commonly used in engineering have been requiring adequate structural monitoring in order to assess the reliability and durability of structure and ensure the safety of its use. Moreover, the tendency has been the development of lightweight, compact and low cost systems, allowing the control of various structural parameters associated to possible structural damage detection.

This dissertation was focused on the study of the embedding fiber optic sensors in composite with carbon fiber reinforcement developed by *VARTM - Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*. The integration of fiber Bragg grating and polymeric optical fiber sensors in the composite allowed the real time monitoring of the composite production process, the cure of the epoxy resin over time and determine its infusion velocity. Since the existence of residual stresses can be limitative to the mechanical performance of the composites, a heat treatment (post-cure) was established according to the information provided by resin suppliers.

In order to access the mechanical properties and performance of composite structure, flexural tests were carried out. Some fractured composites were examined in order to evaluate the influence of optical fibers on the mechanical behaviour of the structure. The repeatability of the process and the good response of the sensors to the deformation experienced by the specimens were examined through the implementation of cycle tests. With the tensile test results, performed on a specimen without embedded fibers, it was possible to check the influence of the carbon reinforcement mesh orientation in the value of composite material elasticity modulus.

# Índice

*O Júri*

*Agradecimentos*

*Resumo*

*Abstract*

Capítulo 1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento e motivações .....	1
1.2.	Objectivos e organização.....	2
1.3.	Estado de Arte .....	2
Capítulo 2.	Fundamentos Teóricos .....	7
2.1.	Fotossensibilidade .....	7
2.2.	Birrefringência .....	7
2.3.	Redes de Bragg .....	8
2.3.1	Princípio de funcionamento .....	8
2.3.2	Propriedades e sensibilidade.....	9
2.3.3	Tipos de redes de Bragg .....	11
2.3.4	Métodos de gravação de redes de Bragg em fibra óptica .....	12
2.4.	Fibras ópticas poliméricas .....	14
2.4.1	Propriedades e aplicações.....	14
2.4.2	Tipos de sensores de fibra óptica polimérica .....	15
2.4.3	Princípio de funcionamento .....	15
2.5.	Compósitos com fibras de carbono de reforço .....	17
2.6.	Teste de flexão em três pontos.....	18
Capítulo 3.	Fibras ópticas embebidas num compósito reforçado com fibras de carbono .....	19
3.1.	Preparação dos Sensores .....	19
3.1.1	Sensores de Bragg em fibra óptica .....	19
3.1.2	Sensores de fibra óptica polimérica .....	20
3.2.	Desenvolvimento do compósito de carbono multidireccional .....	21



Capítulo 4.	Monitorização do compósito polimérico .....	25
4.1.	Monitorização da cura da resina de epóxico.....	25
4.2.	Monitorização dos ensaios mecânicos efectuados sobre o compósito.....	30
4.2.1	Ensaio de flexão em três pontos .....	30
4.2.2	Ensaio de tracção .....	41
Capítulo 5.	Conclusões e trabalho futuro .....	43
5.1.	Conclusões.....	43
5.2.	Trabalho futuro .....	44
Referências Bibliográficas	.....	45

## Capítulo 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento e motivações

Desde a descoberta da fotossensibilidade nas fibras ópticas, notáveis avanços têm sido efectuados em torno deste fenómeno, como é o caso das designadas redes de Bragg em fibras ópticas (FBGs) [Othonos, et al., 1999].

As FBGs (acrónimo em inglês de *Fiber Bragg Gratings*) têm demonstrado ser um elemento vantajoso, e em grande expansão, sendo actualmente implementadas em diversas áreas científicas e tecnológicas, sob a forma de sensores, por possuírem propriedades inigualáveis comparativamente aos sensores convencionais. Insensibilidade a ruído electromagnético, elevada susceptibilidade a perturbações ambientais, a não necessidade de estímulo eléctrico e o facto de possuírem a capacidade de multiplexagem e auto-referenciação (evitando a necessidade de recalibrações) são apenas algumas das características que favorecem a obtenção de sensores mais leves e compactos que permitam a monitorização em tempo real e com grande repetibilidade, tornando-se uma mais-valia [Moszkowicz, 2002; Ferreira, et al., 2004].

Na monitorização de estruturas, onde é possível obter informações ao nível de possíveis falhas ou deformações fornecendo, por sua vez, uma melhor percepção do seu comportamento dinâmico, podem ser utilizados diversos tipos de sensores de fibra óptica tais como cavidades de Fabry-Pérot em fibra óptica, sensores de Brillouin e de Raman, interferómetros de luz-branca em fibra óptica e redes de Bragg [Ferreira, et al., 2004]. Analisando os dados adquiridos pelos sensores é então possível prever o restauro e reforço mais apropriados, para o local em questão, bem como a melhor opção a nível de custos e segurança da estrutura. De todos os sensores referidos, as FBGs, que respondem a estímulos externos como a pressão, o campo magnético, vibrações e temperatura, são as que mais interesse têm despertado por integrarem um número elevado de sensores ópticos numa só fibra óptica [Antunes, 2007; Nogueira, 2005].

Actualmente os sensores de Bragg são utilizados em engenharia civil, geotécnica, biomecânica, indústria aeronáutica, indústria petrolífera, indústria automóvel, redes de energia, engenharia naval, parques eólicos, medicina, indústria química, entre outras [Nogueira, 2005]. Tensão, pressão, aceleração, temperatura, pH, precipitação, velocidade e direcção do vento, são apenas alguns dos parâmetros de maior interesse na monitorização de estruturas através de sensores de Bragg [Lima, et al., 2008].

O facto de a óptica ser uma área em grande desenvolvimento tecnológico e com uma componente prática que me despertou grande interesse, senti a necessidade de escolher um projecto que me possibilitasse adquirir conhecimentos e estabelecer contacto directo com este ramo da Física.

As principais motivações que impulsionaram a concretização deste projecto encontram-se relacionadas com processo de fabricação de sensores de fibra óptica, bem como a sua caracterização, e possível aplicação destes num caso concreto da vida quotidiana.

## **1.2. Objectivos e organização**

O presente estudo consiste no desenvolvimento de um sistema polimérico reforçado com fibras de carbono, com o intuito de monitorizar diversas propriedades desse mesmo material, recorrendo para esse efeito a sensores de fibra óptica. Serão analisados parâmetros de qualidade e estabilidade estrutural do compósito, nomeadamente o nível de cura da resina utilizada no seu desenvolvimento e o seu comportamento em função de variações de deformação.

Esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo é feito um breve enquadramento ao tema desta dissertação e são enunciadas as principais motivações e objectivos para a concretização da mesma. É também apresentado o estado de arte da tecnologia referente à monitorização de estruturas compósitas através de fibras ópticas.

No segundo capítulo são detalhadamente abordados os princípios e fundamentos das fibras ópticas, tanto de sílica como poliméricas, sendo também descritas algumas características relacionadas com compósitos com fibras de reforço.

No terceiro capítulo são apresentadas as etapas inerentes ao processo de desenvolvimento e concepção de um sistema de fibras ópticas embebidas num compósito com fibras de carbono de reforço.

No quarto capítulo é relatada a monitorização do processo de cura da resina, que constitui o compósito, bem como uma avaliação da resposta mecânica de diversos espécimes quando sujeitos a testes de flexão em três pontos e a ensaios de tracção.

Por fim, no capítulo 5, são enunciadas as conclusões relativas ao trabalho efectuado e apresentadas propostas de eventual investigação futura. São também referenciadas possíveis alterações que podem ser implementadas visando a obtenção de melhores resultados.

## **1.3. Estado de Arte**

De forma a se desenvolverem estruturas “inteligentes”, diversos estudos estão a ser efectuados em torno da integração ou acoplamento de sensores de fibra óptica, e outros componentes, sem que se verifique alteração das suas propriedades. Cavidades de Fabry-Pérot (extrínsecas e intrínsecas), interferómetros de luz-branca, sensores de Brillouin e de Raman, e também redes de Bragg são alguns tipos de sensores de fibra óptica que têm sido utilizados para monitorizar estruturas [Ferreira, et al., 2004].

O princípio de funcionamento associado à maioria dos sensores de fibra óptica consiste num encurvamento local da fibra que reduz o ângulo de reflexão crítico havendo perdas de

pequenas quantidades de luz. Quando uma estrutura compósita com fibras ópticas embebidas é danificada, poder-se-á verificar um encurvamento local da fibra e haver uma relação entre os modos propagados e os de radiação [Wevers, et al., 2006].

As redes de Bragg têm sido amplamente utilizadas como sensores ópticos de deformação ou temperatura, por se verificar uma proporcionalidade entre estes parâmetros e o desvio verificado do comprimento de onda de Bragg. As características espectrais únicas das FBGs possibilitam a inserção destas redes em sistemas de comunicações, nomeadamente em cabos submarinos, televisão por cabo (CATV), redes locais de computadores, sistemas de navegação e controle de mísseis ou torpedos guiados, entre outros [Nogueira, 2005; Ferreira, et al., 2004].

Tendo em consideração as reduzidas dimensões das redes de Bragg, e a facilidade de processamento de compósitos, as FBGs podem ser facilmente embebidas ou acopladas em materiais compósitos sem que se verifique uma modificação da estrutura. É possível por exemplo, embeber um sensor de Bragg durante a fase de desenvolvimento de uma determinada estrutura, de modo a promover a optimização dos processos de construção e garantindo aos utilizadores um elevado nível de segurança e controlo. Os parâmetros de maior interesse na monitorização de estruturas, através de sensores de Bragg, são deformação, pressão, aceleração, temperatura, pH, precipitação, velocidade e direcção do vento, entre outros [Lima, et al., 2008; Ferreira, et al., 2004].

Os sensores são colocados em pontos críticos da estrutura a monitorizar e o sinal, que é adquirido por esses sensores, é convertido num sinal digital para posterior análise do comportamento da estrutura. Com a monitorização em tempo real, é possível efectuar uma análise que pode ir desde uma simples medição de tensão até ao estado de fadiga referente à estrutura. Um exemplo concreto de um sistema de monitorização estrutural, recorrendo a redes de Bragg, encontra-se actualmente implementado na igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro onde foram acoplados estrategicamente no arco cruzeiro, possibilitando a calibração de modelos teóricos bem como a detecção das regiões mais susceptíveis a falhas na estrutura [Lima, et al., 2008].

É também possível efectuar um estudo semelhante em plataformas, que se encontram sujeitas a elevadas temperaturas, a ambientes explosivos e a condições ambientais extremas, de forma a auxiliar os operadores. Através de sensores de fibra óptica é possível a obtenção de informação relativa, por exemplo, ao impacto que a ondulação marítima tem, não só no ciclo de fadiga mas também na corrosão da estrutura, sendo estes factores de elevada importância na preservação da segurança da estrutura da plataforma em causa [AS, 2003].

As FBGs têm ainda vindo a ser utilizadas na monitorização da cura de determinados materiais, tais como cimentos, possibilitando a aquisição da temperatura no interior da massa de cimento, ao longo do tempo [Pereira, 2007]. Durante o processamento de estruturas em

camadas, que tem sido uma das técnicas mais investigadas quanto à viabilidade do embebimento de sensores ou componentes funcionais durante o seu desenvolvimento, também é possível monitorizar a cura do material/resina em causa. De notar que a principal finalidade do embebimento de sensores de fibra óptica na estrutura é monitorizar não só o acumular de tensões residuais, durante o processo de fabricação em camadas, mas também o comportamento de temperatura e deformação em simultâneo.

Quando os sensores de fibra óptica são embebidos em estruturas metálicas, vulgarmente utilizadas na indústria automóvel e petrolífera (plataformas), é necessário recorrer a um embebimento não intrusivo da fibra de modo manter a integridade funcional das estruturas. Outro factor que é necessário ter em conta é a temperatura de processamento, sendo bastante superior quando se utilizam metais, verificando-se assim a necessidade de proteger o sensor durante as etapas de deposição a alta temperatura quando o ponto de fusão do material estrutural é superior ao da fibra embebida.

Além de estruturas metálicas, o embebimento de fibras ópticas em materiais poliméricos e cerâmicos também tem sido alvo de investigação. Em compósitos poliméricos, como o ponto de fusão é bastante inferior ao da sílica (fibra óptica), é possível concretizar o processo de embebimento. Em compósitos cerâmicos, como estes exigem uma temperatura de processamento muito elevada, não é possível embeber fibras de sílica, verificando-se a necessidade recorrer a fibras de safira, por exemplo [Li, 2001].

Materiais compósitos poliméricos constituídos por resina de epóxico e fibras de carbono (reforço) são vulgarmente aplicadas na indústria aérea e aeronáutica por serem materiais muito resistentes, de baixo peso e módulo de elasticidade elevado [Gonzalez, et al., 2006].

O facto de o diâmetro da fibra de sílica ser superior ao da fibra de carbono induz alguma tensão, que poderá prejudicar o desempenho mecânico (força flexural, força tensional e comportamento dinâmico) do compósito. Esta alteração das propriedades mecânicas foi constatada num estudo efectuado a um compósito quasi-isotrópico com fibras ópticas embebidas em diferentes camadas, sendo a causa atribuída à interface formada em torno da fibra embebida [Surgeon, et al., 1999]. Embebendo as fibras nas camadas mais superficiais de um compósito produzido através de fibras de carbono *Toray® T300* (orientadas manualmente segundo a sequência 0/-45/45/90° para se obter um material quasi-isotrópico) e resina de epóxico, é possível minimizar as dimensões da referida interface e os seus efeitos no desempenho mecânico da estrutura, uma vez que as tensões residuais nessa região são inferiores [Liu, et al., 2009]. Relativamente ao revestimento da fibra que é embebida no compósito, estudos revelam que fibras com revestimento de polimida promovem uma não só uma melhor adesão ao material do que as comuns fibras de sílica mas também maior resistência interfacial. Porém, é importante ter presente que o revestimento tem grande influência na sensibilidade do sensor, sendo uma fibra sem qualquer revestimento a que mais sensibilidade apresenta [Vieira, et al., 2009].

Os sensores de Bragg em fibra óptica de diâmetro reduzido (52  $\mu\text{m}$ ), comparativamente às fibras ópticas usuais de diâmetro 125  $\mu\text{m}$ , surgem como uma boa solução para a prevenção da deterioração do compósito, uma vez que não se verifica a existência de regiões ricas em resina, podendo estas fibras ser embebidas sem causar praticamente modificações quanto à resistência do laminado [Takeda, et al., 2002].

Os compósitos poliméricos são estruturas consideravelmente rígidas, resistentes à corrosão e as suas propriedades direccionais podem ser modeladas consoante a aplicação a que o compósito se destina. Estas propriedades tornam estes sistemas muito atractivos, porém, é importante analisar o comportamento destas estruturas quando sujeitas a ensaios mecânicos cíclicos de forma a ter uma percepção da fadiga inerente ao compósito. As principais causas de defeitos internos num compósito polimérico, que favorecem a fragilidade do mesmo, são a delaminação, o desacoplamento dos materiais constituintes e a fractura da matriz. Para a detecção destes defeitos pode-se recorrer a técnicas como raios-X ou ultra-sons (*C-Scan*), que exigem algum tempo de análise, ou então à monitorização em tempo real através de sensores, que se tem revelado muito promissores [Shin, et al., 2006; Takeda, et al., 2002].

Recentemente, as fibras ópticas poliméricas (POFs, acrónimo em inglês de *Polymeric Optical Fiber*) com índice em degrau têm despertado um enorme interesse, sendo consideradas uma excelente alternativa aos sensores de Bragg, por serem mais resistentes e flexíveis. Prova disso é o limite elástico de 10% definido para as POFs, comparativamente aos 1% das fibras de sílica, que possibilita a estas fibras sustentar deformações superiores a 30%, sem efectivar fractura e consequentemente torná-las muito atractivas para aplicações que envolvam grandes deformações [Kuang, et al., 2009].

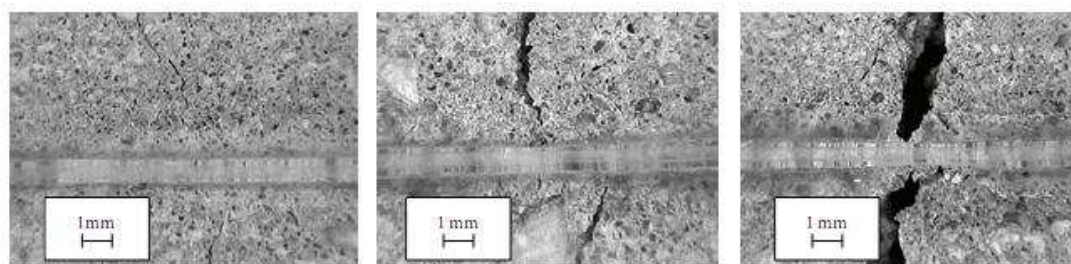


Figura 1.1 – Fotomicrografias da propagação da ruptura numa estrutura com a fibra óptica polimérica embebida [Kuang, et al., 2009].

Este tipo de fibras não é significativamente afectada, mesmo após se efectivarem fracturas severas em torno desta, tal como foi constatado por Kuang e seus colaboradores (Figura 1.1).

Tal como acontece com as fibras ópticas de sílica, quanto maior for o diâmetro das POFs, menor será a resistência da estrutura compósita devido à presença de pequenas cavidades de ar ou de resina. A presença de ar pode ser removida efectuando vácuo no sistema, durante a preparação em camadas do compósito. Relativamente às regiões ricas em resina, estas podem ser

reduzidas recorrendo a fibras ópticas poliméricas de menor diâmetro, verificando-se assim uma redução da espessura e consequentemente um aumentando da flexibilidade da estrutura. Com o intuito de aumentar a sensibilidade dos sensores, o revestimento das POFs é normalmente removido. Schukar e seus colaboradores efectuaram um estudo que consistia na monitorização do sinal na fibra durante o processo de cura da resina utilizada no desenvolvimento do compósito. Uma vez que não foram detectadas variações no sinal é possível inferir que a fibra não é afectada pela resina ou por perturbações mecânicas, nomeadamente pressões associadas à cura [Schukar, et al., 2009].

O futuro remete para uma evolução significativa da tecnologia associada ao uso de fibras ópticas e inteligência artificial em estruturas inteligentes que poderá dar origem a sistemas capazes de efectuar a sua própria monitorização, sem que para tal sejam necessários recursos humanos permanentes, ou até mesmo agendar o controlo e reparação de danos. A utilização de sensores de Bragg em fibra óptica revela-se deste modo extremamente vantajosa por possibilitar a obtenção de um sistema mais compacto, robusto e de baixo custo para o estudo de múltiplos parâmetros [Rao, 1997].

## Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Fotossensibilidade

O fenómeno físico, não linear, da fotossensibilidade nas fibras foi pela primeira vez observado em experiências, realizadas por Hill e seus colaboradores, com fibras ópticas de sílica dopadas com germânio, em 1978. A experiência consistia na injeção de radiação de um laser de iões de árgon (480nm) no núcleo da fibra tendo sido verificado, durante a exposição, um aumento na atenuação da fibra e, após a exposição, um aumento da reflectividade da luz na fibra com o decorrer do tempo [Othonos, et al., 1999; Mastro, 2005].

Estudos efectuados posteriormente atribuíram o referido incremento da reflectividade à formação de uma modulação periódica, fotoinduzida, do índice de refração no núcleo. Após alguma investigação sobre a fotossensibilidade nas fibras, foi provado que a modificação da amplitude do índice de refração dependia do quadrado da potência do laser de escrita no comprimento de onda de 480nm. Tal dependência apontava o processo de absorção de dois fotões, devido a centros de germânio deficientes em oxigénio na matriz de sílica (aquando do processo de dopagem do núcleo da fibra com  $\text{GeO}_2$ ), como o principal causador da alteração do índice de refração do núcleo da fibra [Othonos, et al., 1999; Antunes, 2007].

É importante ter presente que, durante a exposição de uma fibra óptica fotossensível à radiação UV, parâmetros relacionados com absorção, birrefringência, estado de tensão, densidade, índice de refração ou densidade alteram-se [Nogueira, 2005].

Por possuírem imunidade a interferências electromagnéticas, dimensões e peso reduzidos, baixas perdas de transmissão e inserção, isolamento eléctrico, sensibilidade elevada, baixo custo de implementação e por possibilitarem a monitorização remota, as FBGs demonstram ser o elemento ideal a usar em telecomunicações e sensores [Yu, et al., 2002].

### 2.2. Birrefringência

Em teoria, uma fibra óptica monomodo apresenta uma geometria perfeitamente cilíndrica e o material que a constitui é isotrópico. Nesta situação não há acoplamento dos dois modos degenerados que usualmente são suportados por este tipo de fibras. Experimentalmente, o que se verifica é uma alteração da geometria da fibra ou uma anisotropia pouco significativa do material. Estas variações levam a que a propagação dos modos polarizados seja diferente nas duas direcções ortogonais, o que leva a que a birrefringência, ou seja, a forma como a luz se propaga, não se mantenha constante ao longo da fibra.



Quando a fibra se encontra embebida num compósito, é possível identificar este fenómeno através do estado de integridade da rede de Bragg, isto é, se no espectro de reflexão da rede forem visíveis mais do que um pico, significa que existe birrefringência na rede de Bragg embebida.

## 2.3. Redes de Bragg

### 2.3.1 Princípio de funcionamento

As fibras ópticas não são mais do que guias de ondas cilíndricos de sílica constituídos por um núcleo concêntrico com uma bainha. Por possuírem índices de refração diferentes, sendo o do núcleo superior ao da bainha, asseguram a reflexão interna total na fibra o que possibilita a transmissão de luz.

Quando o núcleo de uma fibra de sílica, dopada com germânio, é exposto não a um feixe de radiação ultravioleta (UV) mas à interferência de dois feixes, verifica-se um aumento do índice de refração na região de interferência construtiva, o que provoca um aumento da reflectividade, contrariamente ao observado nas zonas de interferência destrutiva, onde não há nenhuma modificação do índice de refração [Ghatak, et al., 2008]. Como resultado da exposição ao padrão de interferência, e graças à fotossensibilidade que a fibra óptica apresenta, surge uma alteração periódica e permanente do índice de refração ao longo do núcleo da fibra. Como consequência desta alteração podem surgir redes de difracção que actuam por filtragem, em reflexão, de certos comprimentos de onda possibilitando a transmissão dos restantes sem a ocorrência de perdas. Tal é possível por se verificar uma alteração do índice de refração de pequenos segmentos do núcleo da fibra óptica que possibilita a transmissão da maioria dos comprimentos de onda da luz e reflexão de outros com valor específico [Marques, 2008].

É possível distinguir dois tipos: redes de Bragg, com período curto e que acoplam modos na fibra que se propagam em direcções opostas; ou redes de transmissão, que apresentam período longo e acoplam modos que se propagam na mesma direcção [André, 2002].

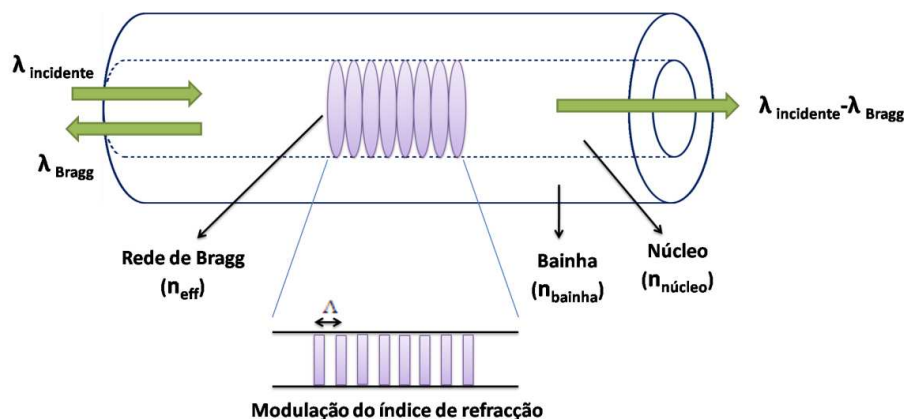


Figura 2.1 – Representação esquemática do princípio de operação das redes de Bragg uniforme, com modulação de índice constante em amplitude e período,  $\Lambda$ , das franjas gravadas (adaptado de [Othonos, et al., 1999]).

Ao injectar luz no núcleo da fibra óptica, esta será dispersa por cada plano da rede de Bragg perpendicular ao eixo longitudinal da fibra. Faz sentido então afirmar que para cada rede há um comprimento de onda, designado por comprimento de onda de Bragg, para o qual é satisfeita a condição de ressonância, na qual as ondas geradas em cada plano se encontram em fase, originando uma reflexão forte.

Uma vez que a propagação da radiação, ao longo da fibra, se encontra relacionada com a condição de Bragg, que impõe que o espectro de reflexão se encontre centrado no comprimento de onda de Bragg, é importante ter presente que se a condição de primeira ordem:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (2.1)$$

onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg, para o qual ocorre o máximo das interacções,  $\Lambda$  é o período da rede de difracção e  $n_{eff}$  o índice de refracção efectivo dos modos guiados; não for satisfeita, a luz reflectida por cada plano fica progressivamente fora de fase acabando, na eventualidade, por se anular. Se a condição de Bragg for satisfeita, então a fracção de luz que é reflectida, por cada plano da rede, soma-se construtivamente na direcção contrária, resultando num sinal reflectido com comprimento de onda central dependente dos parâmetros da rede de Bragg [Othonos, et al., 1999].

### 2.3.2 Propriedades e sensibilidade

Numa rede de Bragg uniforme, com índice de refracção médio de  $n_0$ , a modulação do índice ao longo da fibra,  $n(z)$ , pode ser descrito por:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.2)$$

onde  $\Delta n$  representa a amplitude de modulação do índice de refracção (apresentando valores típicos na ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$ , sendo o mais característico  $10^{-4}$ ) e  $z$  a distância ao longo do eixo longitudinal [Othonos, et al., 1999].

Tal como já foi referido anteriormente, esta alteração do índice de refracção é permanente. Porém, a rede de Bragg gravada pode ser modificada expondo a FBG a radiação UV, a altas temperaturas, a grandes elongações ou a outras fontes de radiação externas. É assim importante ter presente as condições em que a FBG vai ser implementada, uma vez que os limites de elongação e de temperatura, para que a modulação se mantenha intacta, ocorrem além do limite de quebra da fibra e abaixo da temperatura de fusão da mesma, respectivamente. A temperatura máxima limite encontra-se dependente do comprimento de onda utilizado na gravação da rede de difracção e da própria natureza da fibra [Antunes, 2007].

De igual modo ao verificado para os outros sensores de fibra óptica, os sensores de Bragg são sensíveis a deformações mecânicas,  $\Delta l$ , ou variações de temperatura,  $\Delta T$ , que provocam alterações no índice de refração efectivo do núcleo da fibra e na periodicidade do padrão de interferência da FBG. Como consequência destas alterações, o comprimento de onda que é reflectivo pela rede de Bragg também é modificado de acordo com a expressão:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.3)$$

O primeiro termo desta equação é referente à perturbação mecânica a que a fibra óptica se encontra sujeita e o segundo representa a alteração que a temperatura provoca no comprimento de onda de Bragg. O valor típico do índice de refração efectivo numa fibra de sílica dopada com germânio é de  $n_{eff} = 1.482$  [Othonos, et al., 1999].

As alterações provocadas pela aplicação de uma força mecânica ou variações de temperatura na rede de Bragg são quantificadas pelos coeficientes termo-óptico e de expansão térmica, bem como pela constante fotoelástica. Considerando o caso em que a FBG é sujeita apenas a variações de temperatura, ou seja  $\Delta l = 0$ , a equação (2.3) surge sob a forma de:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T = S_T \Delta T \quad (2.4)$$

em que  $\alpha_\Lambda = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$  é designado por coeficiente de expansão térmica da fibra ( $\alpha_\Lambda \approx 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para o caso em que a fibra é de sílica),  $\alpha_n = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$  representa o coeficiente termo-óptico ( $\alpha_n \approx 8.60 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para o caso em que a fibra é de sílica e dopada com germânio) e  $S_T = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)$  a sensibilidade que a rede de Bragg apresenta à temperatura. É importante referir que, mesmo não sendo sujeita a qualquer tipo de tratamento antes da exposição à radiação, a FBG apresenta perdas térmicas com o decorrer do tempo, mesmo à temperatura ambiente [Othonos, et al., 1999; Ferreira, et al., 2004].

Analogamente, quando a FBG não se encontra sujeita a variações de temperatura,  $\Delta T = 0$ , é possível rescrever a equação (2.3):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \Delta \epsilon \quad (2.5)$$

onde  $p_e$  é a constante fotoelástica da sílica ( $p_e \approx -0.22$ ) e  $\Delta \epsilon$  é a deformação longitudinal que a rede sofre [Ferreira, et al., 2004]. É importante ressaltar que, tal como acontece com outros tipos de sensores, ao acoplar ou embutir os sensores de Bragg numa estrutura, a equação (2.5) não é inteiramente válida, uma vez que a temperatura impõe uma certa deformação ao sensor através da expansão térmica do material que constitui a própria estrutura.

A deformação a que uma FBG é sujeita ( $\Delta\varepsilon$ ) pode ser determinada através da expressão:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{S_\varepsilon} \quad (2.6)$$

onde  $S_\varepsilon$  representa a sensibilidade à deformação longitudinal a que a FBG se encontra sujeita e na região espectral de 1550nm toma o valor de 1.25pm/ $\mu\varepsilon$  (1.25 pm por cada deformação relativa de 1 microstrain) [Othonos, et al., 1999].

O facto do comprimento de onda de Bragg variar, aquando da aplicação de perturbações externas que alteram o espaçamento da rede de difracção e o índice de refração, leva a que estes dispositivos sejam utilizados como sensores. O desvio de comprimento de onda de Bragg é medido através de um sistema de interrogação adequado que deve garantir a transdução da variação de comprimento de onda num sinal. Deverá também apresentar elevada sensibilidade, imunidade a flutuações de potência, custo reduzido, facilidade de multiplexagem e também alguma estabilidade quando sujeito a perturbações externas, como mudanças de temperatura [Ferreira, 2000].

### 2.3.3 Tipos de redes de Bragg

Existem diversos tipos de redes de Bragg, sendo estas classificadas consoante o tipo de fotossensibilidade: tipo I, tipo II (dependente das condições iniciais de gravação e das propriedades da fibra óptica), tipo IIA [Nogueira, 2005].

As redes de Bragg do tipo I são as mais usuais e são gravadas (com intensidade moderada) em fibras fotossensíveis normais verificando-se um crescimento monótono da amplitude de modulação do índice de refração da fibra. Nesta rede, o espectro de reflexão do modo guiado é complementar ao de transmissão, revelando baixas perdas por absorção ou reflexão que se verificam na bainha. É ainda significativo o comportamento que as redes de tipo I têm com a variação de temperatura possibilitando a sua aplicação como sensores ou até mesmo em telecomunicações. A gama de temperatura sob a qual estas redes operam é de  $-40^\circ$  a  $80^\circ\text{C}$ , podendo ser apagadas quando expostas a temperaturas em torno dos  $200^\circ\text{C}$  [Othonos, et al., 1999].

As redes de tipo II por norma são gravadas com recurso a um laser pulsado de alta energia e, como consequência das elevadas intensidades dos pulsos de energia, as redes de tipo II apresentam um espectro de reflexão e de transmissão no qual não é observável um pico bem definido contrariamente ao que se obtém para as de tipo I. Tal pode estar associado a possíveis danos físicos no núcleo, advindos da exposição intensa e irregular a que a fibra é sujeita, que tornam difícil a reversão da modulação do índice de refração. Relativamente à dependência com a temperatura, estas redes podem ser submetidas a temperaturas que podem ir até aos  $800^\circ\text{C}$ ,

não interferindo na alta estabilidade que estas apresentam, comparativamente às de tipo I, a elevadas temperaturas [Othonos, et al., 1999].

Quando uma rede do tipo I, gravada numa fibra com elevada concentração de  $\text{GeO}_2$ , é continuamente exposta à radiação laser ultravioleta (UV), esta pode ser apagada seguindo-se o crescimento de uma nova rede com variação negativa do índice de refração, sendo esta designada por rede de Bragg do tipo IIA [Nogueira, 2005]. No que toca a estabilidade, estas redes apresentam-se mais estáveis do que as de tipo I e menos do que as de tipo II.

### 2.3.4 Métodos de gravação de redes de Bragg em fibra óptica

As redes de Bragg podem ser gravadas por processos internos ou externos. As redes inscritas por métodos internos não possuem grande utilidade, uma vez que o comprimento de onda de operação se encontra limitado ao de gravação, enquanto que as redes gravadas por métodos externos possibilitam a obtenção de uma elevada amplitude de modulação do índice de refração, aumentando deste modo a utilidade das redes de Bragg [Othonos, et al., 1999].

É possível gravar redes de Bragg em fibras fotossensíveis através de métodos externos como o interferométrico, ponto a ponto ou por máscara de fase.

No método interferométrico há separação da radiação laser UV em dois feixes que se recombinam formando um padrão de difração. O padrão é direccionado para a região exposta da fibra induzindo desta forma uma modulação permanente do índice de refração do núcleo. Esta técnica de gravação apresenta a desvantagem da montagem ser sensível a vibrações mecânicas e correntes de ar que podem causar defeitos no padrão produzido [Klemba, 2005].

A gravação ponto a ponto, que se revela vantajosa pela facilidade com que se podem alterar os parâmetros da rede a gravar, consiste numa modulação passo a passo do índice de refração, ao longo do núcleo da fibra. A radiação UV é transmitida através de uma fenda e o feixe é focado no núcleo da fibra, modificando localmente o índice de refração. Este processo repete-se de forma a formar a rede de Bragg. Por ser um processo longo e exigir alguma estabilidade do sistema durante a gravação, a referida técnica revela-se desvantajosa, na produção de redes de Bragg, podendo resultar numa rede com curta duração [Othonos, et al., 1999].

A técnica utilizada na gravação das redes de Bragg em estudo foi com recurso a uma máscara de fase (fabricada a partir de um processo de fotolitografia de elevada resolução), sendo um dos métodos mais eficazes e simples, na qual o feixe de radiação UV incide perpendicularmente num elemento óptico difractivo, composto por uma sequência de deformações longitudinais numa das superfícies de um substrato de sílica (máscara de fase), que separa o feixe nas ordens  $m=0$  e  $m=\pm 1$  [Antunes, 2007].

A máscara é seleccionada de modo a que a sua superfície possibilite a supressão do feixe difractado de ordem zero, e consequentemente maximize os de ordem  $-1$  e  $+1$ . Estes vão posteriormente sobrepor-se de forma a gerar um padrão de interferência que, à semelhança do método interferométrico, vai provocar uma modulação do índice de refração ao longo da fibra só que, neste caso, a referida modulação tem metade do período da máscara. Deste modo, por o período do padrão de interferência gerado pela sobreposição dos feixes estar relacionado apenas com o período da máscara de fase, verifica-se a necessidade de utilizar diferentes máscaras quando se quer produzir redes de Bragg a comprimentos de onda bem distintos [Marques, 2008].

As principais vantagens inerentes a esta técnica residem no facto de se utilizar um elemento compacto, de fácil alinhamento e pouco sensível a vibrações; não ser necessária fonte UV de elevada coerência para formar o padrão de interferência; a fibra se encontrar em contacto, ou muito próxima, da máscara possibilitando a máxima modulação do índice de refração; e também por facultar a produção de redes de elevada qualidade e de fácil reproduzibilidade. De notar que a fonte de radiação UV deve ser espacialmente coerente e que outros elementos ópticos de focagem podem ser utilizados para que o padrão seja de facto gravado no núcleo da fibra [Klemba, 2005; Marques, 2008].

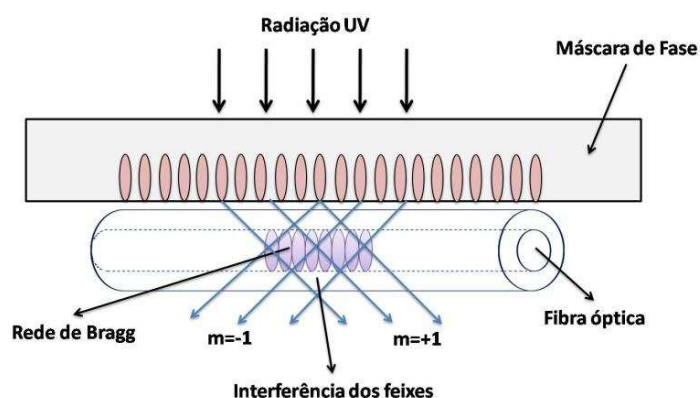


Figura 2.2 – Representação da técnica de gravação de redes de Bragg em fibras ópticas recorrendo a uma máscara de fase.

É ainda possível conjugar a técnica interferométrica com a máscara de fase, sendo o sistema composto por dois espelhos planos (paralelamente dispostos entre si) e a máscara de fase, cuja superfície é alinhada perpendicularmente aos espelhos. O feixe de radiação UV atravessa a máscara de fase, sendo as ordens  $-1$  e  $+1$  direccionadas para os espelhos, compreendidos entre a máscara e a fibra, e focadas numa fracção do núcleo da fibra, gravando assim a rede. Esta técnica é presentemente utilizada, no sistema de gravação de redes do laboratório de optoelectrónica, no I3N/Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

De salientar que quanto maior for o tempo de exposição a que a fibra está sujeita, maior é a amplitude de modulação e consequentemente, maior será o valor do índice de refração.

## 2.4. Fibras ópticas poliméricas

Por possuírem fácil manuseamento e conectividade, elevada flexibilidade e baixo custo, as POFs têm sido implementadas em diversas aplicações que vão desde a sua utilização como um guia simples de transmissão de luz em comunicações ópticas até ao seu uso como sensores para medida da distância, posição, forma, cor, brilho, opacidade, densidade, turbulência, entre outros [Zubia, et al., 2001].

### 2.4.1 Propriedades e aplicações

Comparativamente às fibras de sílica, estes componentes são mais atractivos uma vez que operam na gama do visível, possuem maior resistência à fractura e a vibrações; e requererem equipamento de aquisição mais simples e mais barato [Polishuk, 2006]. Um exemplo do baixo custo associado à utilização das POFs é quando estas são utilizadas como sensores, requerendo apenas dispositivos básicos de estado-sólido como LEDs e fotodetectores.

O facto de apresentar uma atenuação aceitável apenas no espectro visível (de 520nm até 780nm), não favorece a aplicação deste tipo de fibras em comunicações de longa distância, uma vez que as perdas por transmissão a estes comprimentos de onda são elevadas, podendo atingir valores de 150 a 1000 dB/Km, consoante o material constituinte da fibra [Polishuk, 2006].

Enquanto que as fibras de sílica são relativamente frágeis e quebram com facilidade, as POF, por serem constituídas por materiais plásticos, são mais flexíveis, possibilitando a transmissão de luz mesmo depois de ter ultrapassado a barreira da elongação plástica. Devido às características do material da fibra óptica polimérica, esta apresenta um módulo de Young que pode ir até duas ordens de grandeza abaixo do valor associado às fibras de vidro. Este factor revela a vantagem que estas fibras apresentam, face às de vidro, na monitorização de estruturas [Husdi, et al., 2004].

Em termos de apresentação, a diferença mais significativa entre uma POF e uma fibra de vidro é relativa ao diâmetro do núcleo (tipicamente 0.25-1mm) que, além de ser bastante superior ao das fibras de sílica, este é cerca de 98% do diâmetro da bainha, o que possibilita ao feixe de luz que é injectada atravessar a fibra com o raio de curvatura menor e sem interrupções [Zubia, et al., 2001].

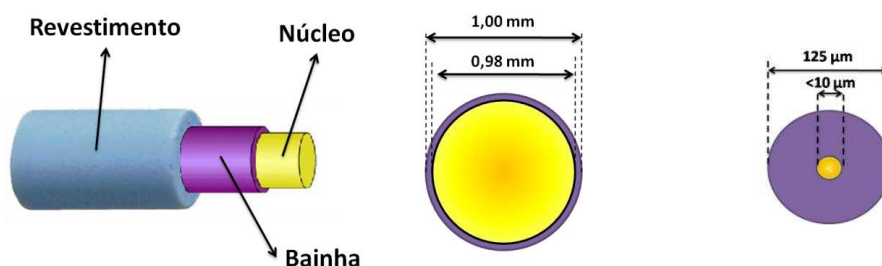


Figura 2.3 – Composição de uma fibra óptica (esquerda) e representação das dimensões de uma fibra óptica polimérica (centro) e uma fibra óptica monomodo (à direita).

Tendo em consideração as características descritas nos parágrafos anteriores, este tipo de fibra óptica tem sido alvo de estudo para a sua aplicação na indústria aeronáutica e aeroespacial.

#### **2.4.2 Tipos de sensores de fibra óptica polimérica**

Embora muitas das aplicações das fibras ópticas sejam baseadas na capacidade que estas apresentam em transmitir um sinal óptico com perdas reduzidas, também há casos em que se verifica a necessidade das fibras serem sensíveis a factores externos de modo a funcionarem como sensores. Temperatura, humidade, pressão, detecção da presença de determinados compostos orgânicos e inorgânicos numa solução, deslocamento, nível de toxicidade e índice de refração são apenas alguns dos parâmetros que é possível monitorizar com recurso às fibras ópticas poliméricas de polimetilmetacrilato (PMMA). Dos vários métodos que possibilitam a detecção dos referidos parâmetros, os mais utilizados têm como base o princípio físico da modulação da intensidade luminosa [Zubia, et al., 2001].

Na generalidade os sensores podem ser classificados como: intrínsecos, extrínsecos ou híbridos. Os intrínsecos, apresentam uma alteração das propriedades ópticas por influência do parâmetro que está a ser medido, reflectindo-se numa modulação da luz; os extrínsecos têm a finalidade de transferir os dados relativos à medição do parâmetro para um dado local; e os híbridos transferem a luz ao longo da fibra para futura conversão em energia que irá alimentar um sensor convencional distante. Geralmente os sensores desenvolvidos através de POFs são intrínsecos e, embora em muitas aplicações com fibras ópticas requeiram uma transmissão do sinal óptico com baixas perdas associadas, neste caso o ideal é que o sensor seja extremamente sensível ao parâmetro que se pretenda analisar [Kalymnios, et al., 2004].

Com base na fibra óptica polimérica é possível distinguir sensores: de intensidade, utilizados para medição de parâmetros físicos; químicos, para medidas de fluorescência ou de campo evanescente; e médicos (ou bio-sensores), por norma de dimensões suficientemente pequenas para possibilitam a medição de parâmetros no interior do organismo, tais como pH, temperatura, electrólitos, entre outros [Kalymnios, et al., 2004].

#### **2.4.3 Princípio de funcionamento**

Nesta dissertação, o parâmetro que se pretende monitorizar são as variações de índices de refração, recorrendo para tal a um sensor de fibra óptica intrínseco. Removendo o revestimento da POF e polindo parcialmente um dos lados da fibra, é possível efectuar uma análise às perdas de potência óptica aquando da passagem do líquido pela região polida.

Este sensor baseado em POF tem como princípio de funcionamento as equações de Fresnel, que retratam a reflexão e transmissão de ondas electromagnéticas numa interface, e a lei de Snell. Quando a radiação se encontra confinada numa fibra óptica parte é reflectida,



ocorrendo reflexão total quando o ângulo da radiação incidente é superior ou igual ao ângulo crítico,  $\theta_c$ . A resposta do sensor pode ser relacionada com a variação do índice de refração na referida interface:

$$\frac{V_n}{V_{ar}} = \frac{\int_{\theta_c}^{90} R_n}{\int_{\theta_c}^{90} R_{ar}} \quad (2.7)$$

onde  $V_n$  e  $V_{ar}$  representam a diferença de potencial detectada após a interface núcleo-meio e núcleo-ar, respectivamente; e  $R_n$  e  $R_{ar}$  representam a fracção da intensidade de luz reflectida [Bilro, et al., 2009].

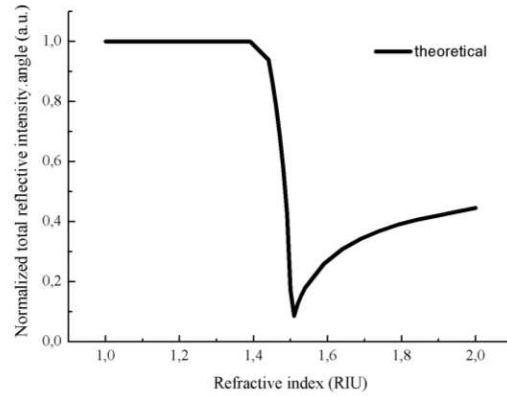


Figura 2.4 – Representação do ângulo de intensidade total reflectida em função do índice de refração [Bilro, et al., 2009].

Por outro lado, uma POF polida lateralmente é também uma estratégia válida para um sensor de flexão que neste trabalho será útil para a monitorização óptica da fractura do compósito. O princípio de funcionamento destes sensores rege-se pela óptica geométrica e consiste numa medida da atenuação verificada na potência do sinal transmitido em função do ângulo de encurvamento da fibra óptica. A radiação reflectida ou refractada/dispersada, na interface polida, não são mais do que uma medida das perdas associadas ao processo de polimento a que a fibra óptica foi submetida. Quando há encurvamento da região polida, verifica-se um aumento da radiação que é refractada e por sua vez a quantidade de radiação que chega ao fotodetector vai ser inferior [Bilro, et al., 2008].

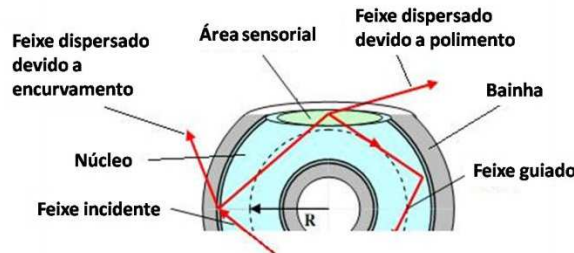


Figura 2.5 – Propagação do feixe de luz que é injectada no núcleo da fibra, que sofreu polimento, quando esta se encontra curvada (adaptado de [Lomer, et al., 2007]).

## 2.5. Compósitos com fibras de carbono de reforço

Compósito é a designação que se costuma atribuir a um material formado por mais do que um constituinte que, entre si, são macroscopicamente distintos. Por norma, uma estrutura compósita apresenta uma matriz (fase contínua), sendo tipicamente um polímero para processamento a baixas pressões e temperaturas, sobre a qual se pode incorporar fibras de reforço, de modo a conferir resistência ao material. Desta forma, o bom desempenho do compósito, aquando da aplicação de esforços sobre este, encontra-se relacionado não só com as características atribuídas aos materiais macroscópicos mas também com a eficácia associada ao reforço da matriz compósita [Fortes, et al., 2003].

Um compósito com fibra de carbono de reforço, utilizado para a concretização do presente estudo, possui uma matriz termoendurecível que aglomera as fibras de carbono, dispostas em camadas unidireccionais ou multidireccionais, transmitindo-lhes os esforços mecânicos e contribuindo com alguma ductilidade (em geral pequena) para o compósito. Além do que foi referido, a resina também tem como função evitar a propagação de fendas quando se verifica ruptura das fibras de reforço [Lima, 1987].

Como resinas termoendurecíveis é possível distinguir as polímidas, sendo as mais caras por suportarem elevadas temperaturas, as de epóxido, usadas na preparação de pré-impregnados, as de poliéster, de uso geral, e as fenólicas, que conferem ao compósito elevada resistência ao fogo [Fortes, et al., 2003].

**Tabela 2.1 – Características principais da fibra de carbono e da resina de epóxido, que foram usados na obtenção do compósito a ser monitorizado neste projecto, e valores teóricos referentes ao sistema da resina curada (4 horas a 70 °C mais 6 horas a 80 °C) com reforço de carbono [Hexion; Toray; Fortes, et al., 2003].**

Material	Deformação na ruptura (%)	Módulo de Young (GPa)
Resina de epóxido	1.0	3.1
Fibra de carbono	1.4	230.0
Sistema resina+reforço	---	23.4

Compósitos derivados da resina de epóxido e fibras de carbono têm sido amplamente aplicadas em estruturas para a indústria aeronáutica, automóvel, entre muitas outras que requerem materiais leves, resistentes e com elevado módulo de Young. Elevada rigidez, resistência à deformação, resistência química e boa adesão a diversos substratos são algumas propriedades que tornam esta resina bastante atractiva.

Além de todas as vantagens já referidas, a facilidade com que se conseguem incorporar fibras ópticas durante o processo de obtenção do compósito, possibilita a utilização deste tipo de materiais no fabrico de estruturas adaptáveis à aplicação a que se destinam.

## 2.6. Teste de flexão em três pontos

De forma a analisar a resistência de um dado material, quando sujeito a forças, são realizados ensaios mecânicos tendo em consideração modelos e normas adequadas às dimensões da estrutura.

O teste de flexão em três pontos é um ensaio normalizado para a determinação do módulo de elasticidade à flexão que consiste na aplicação de uma força concentrada no meio do espécime e perpendicularmente a esta, podendo ocorrer a fractura do espécime por tracção das suas fibras inferiores [Correia, et al., 2006].

Tendo em consideração as dimensões do espécime e a distância entre os pontos sobre os quais é colocado o compósito,  $L$ , é possível determinar o módulo de elasticidade à flexão,  $E_f$ , referente ao espécime em questão através de:

$$E_f = \frac{L^3}{48I} \times m = \frac{L^3}{4bh^3} \times m \quad (2.8)$$

onde  $I = bh^3/12$  é o momento de inércia para provetes de secção rectangular,  $b$  é a largura do espécime,  $h$  a espessura e  $m$  é equivalente ao declive da recta de ajuste efectuado ao valores da força em função da deflexão, no regime elástico [Brown, 2002; Li, et al., 2007].

## Capítulo 3. Fibras ópticas embebidas num compósito reforçado com fibras de carbono

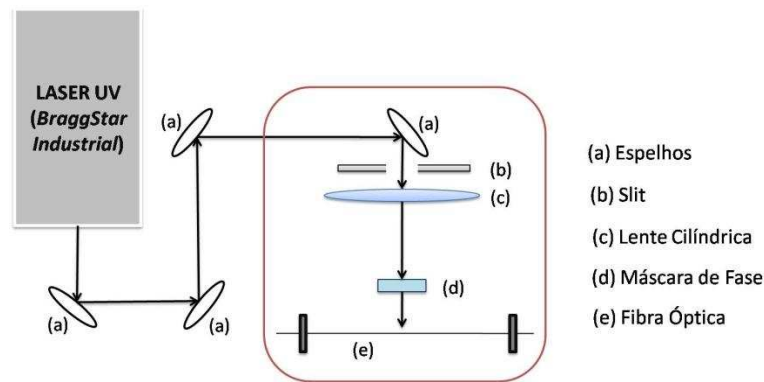
Os sensores de Bragg, à semelhança de outros sensores de fibra óptica, avaliam o comportamento de um dado elemento quando este se encontra sujeito a uma deformação ou variação de temperatura, dando os resultados dessa deformação ou temperatura em simultâneo. Relativamente a sensores de fibras ópticas poliméricas, estes são vulgarmente usados na avaliação do nível de cura (processo de reticulação no qual se formam ligações químicas entre cadeias macromoleculares) de diversos materiais com base na variação do índice de refração. Deste modo, a reacção de polimerização de uma dada resina pode ser monitorizada por estas fibras uma vez que a densidade dessa resina se encontra relacionada com o índice de refração.

Seguidamente será descrito todo o processo realizado com o intuito de monitorizar a cura, durante o desenvolvimento de compósitos com fibra de carbono de reforço, bem como a resistência mecânica que estes possuem. Estes polímeros são utilizados em estruturas com aplicações na indústria aeroespacial não só por apresentarem excelentes propriedades mecânicas, demonstrando ser um material mais resistente que o aço quando lhe são aplicadas forças externas, mas também por não serem praticamente detectáveis por radares [Othonos, et al., 1999].

### 3.1. Preparação dos Sensores

#### 3.1.1 Sensores de Bragg em fibra óptica

Após a remoção do revestimento (acrilato) das fibras ópticas de sílica fotossensíveis da *FiberCore (PS 1250/1500)*, procedeu-se à gravação das redes de Bragg, pelo método da máscara de fase, num sistema implementado no Laboratório de Óptica do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro. O sistema é composto por: componentes ópticos, que direccionam o feixe de um laser de excímeros pulsado *BraggStar Industrial* ( $\lambda=248\text{nm}$ ) da *Coherent*, sistema de refrigeração do laser, mesa óptica *Newport RS4000*, plataforma *Newport TILT* de três eixos, fenda da *Melles Griot* (largura ajustável de 0 a 4mm e resolução de  $1,5\mu\text{m}$ ), espelhos, lente de focagem cilíndrica, máscara de fase, fibra óptica fotossensível e suportes magnéticos que fixam a fibra durante o processo de gravação. Acoplado a este sistema de gravação encontra-se um analisador de espectros ópticos ONA (acrónimo em inglês de *Optical Network Analyzer*), com resolução abaixo do nanómetro, que possibilita o acompanhamento em tempo real do processo de gravação da rede (medindo a reflectividade ou a transmissividade da rede).



**Figura 3.1 – Esquema geral do sistema utilizado para a escrita das redes de Bragg, em fibra óptica, pelo método da máscara de fase.**

Deve-se ter em consideração a colocação da fibra óptica fotossensível a uma distância reduzida da máscara de fase, de modo a que a região onde se pretende gerar a rede de Bragg se encontre na zona onde se verifica sobreposição das ordens difractadas. O laser utilizado na gravação deve exibir coerência espacial superior a esta distância, não havendo grande interveniência da coerência temporal uma vez que o percurso óptico das duas ordens é similar. É importante ainda salientar que a mesa que sustenta o sistema se encontra suspensa através de ar comprimido, para que a estabilidade do sistema seja assegurada, e que todo o sistema se encontra envolto numa caixa de acrílico que o protege de poeiras e alterações no ambiente que o rodeia.

Após o processo de gravação das redes, as extremidades das FBG foram devidamente clivadas e fundidas a extensões ópticas (*E2000/APC*), também designados por *pigtails*, previamente preparados, possibilitando a aquisição de dados. Seguidamente colocaram-se emendas na zona de fusão, tendo o cuidado de manter parte do revestimento do *pigtail* no interior da emenda, para evitar possíveis quebras durante o processo de desenvolvimento do compósito. O recurso a emendas revelou-se de extrema importância tendo por base os estudos inicialmente efectuados, em compósitos de diferentes dimensões, onde se presenciava o quebrar das FBGs no local de fusão da fibra à extensão óptica, ao se realizar vácuo.

### 3.1.2 Sensores de fibra óptica polimérica

Complementou-se o presente estudo com a inserção de POFs pelo facto destas já terem sido implementadas num projecto previamente desenvolvido que consistia na monitorização da cura da resina *advanced<sup>2</sup> X6* (400ml) (*RE400E*). Com a realização do referido projecto foi possível confirmar que a POF é um bom método para monitorizar a reacção de polimerização da referida resina, sendo possível a observação das várias etapas aquando da variação do índice de refração do meio envolvente ao sensor. Por comparação das várias POFs que foram estudadas observou-se que, por norma, a fibra mais polida era a que apresentava maior sensibilidade a pressão

transversal e que, ao aplicar valores mais elevados de pressão sobre a fibra, o sensor vai perdendo potência óptica, permitindo correlacionar negativamente as duas grandezas.

De forma a monitorizar a cura da resina utilizada no desenvolvimento do compósito, prepararam-se algumas POFs (*HFBR-RUS100*). Recorrendo ao método mecânico, através do qual se poliram as POFs lateralmente, procedeu-se à remoção de parte do revestimento e da bainha da fibra de forma a minimizar erros de leitura e aumentar a sensibilidade das fibras.

As fibras foram ajustadas à incisão de três cilindros de diâmetros diferentes ( $\emptyset$ ) que foram depois acoplados a um de maiores dimensões. O conjunto foi depois colocado sobre uma máquina de polimento (*Logitech PM2*), dando-se início ao polimento por gravidade, sendo a homogeneidade do polimento assegurada pelo movimento excêntrico que o braço da polidora efectua durante todo o processo. Foram utilizados abrasivos *Rhinodry (Indasa)* e pasta de diamante (*DP-paste Struers*).

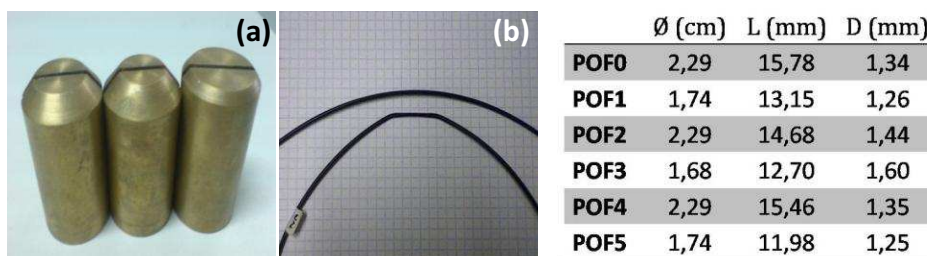


Figura 3.2 – Processo de polimento lateral das POFs: (a) cilindros utilizados no processo; (b) diferença entre POFs com (em cima) e sem polimento (em baixo). À esquerda: apresentação dos valores medidos, após o processo, em que  $L$  é o comprimento de polimento e  $D$  a espessura da região sensível da fibra.

O processo de polimento foi realizado a uma velocidade de 30 r.p.m e em três estágios: desbaste (durante 2 minutos), realizado com um abrasivo P320 (maior granulometria); polimento (com a duração de 2 minutos e 30 segundos), efectuado com uma abrasivo P600; e acabamento, efectuado durante 30 minutos e em regime lubrificante, no qual se utilizou um pano de polimento com pasta de diamante da *Struers*. Após o polimento lateral das várias POFs, as extremidades destas foram clivadas (com um clivador *P/N IF-FC1*) e polidas (primeiro utilizou-se um papel de polimento 600 terminando com um filme de polimento de 3  $\mu$ m), de forma a obter um melhor acoplamento entre fibra, LED e fotodetector.

### 3.2. Desenvolvimento do compósito de carbono multidireccional

O compósito com fibra de carbono de reforço, RCFCs (acrónimo em inglês de *Reinforced Carbon Fiber Composites*), não é mais do que várias camadas de tecido de fibra de carbono embebidas num polímero (epóxico), resultante da reacção de uma resina de epóxico com poliamida (agente catalisador ou endurecedor). É importante referir a importância que a orientação e o alinhamento da malha têm na optimização da resistência e rigidez do compósito.

Para a obtenção do compósito estudado no presente projecto, recorreu-se à técnica de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (*Vacuum Assist Resin Transfer Molding, VARTM*). Procedeu-se então ao corte do tecido (tafetá) de fibra de carbono (cerca de  $195\text{g/m}^2$ ) *Toray® T300*, com as mesmas características a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$ , de forma a se obterem 9 camadas com dimensões de  $100 \times 830\text{mm}^2$  (Classe IV, *ISO 14125*). Seguidamente realizou-se todo o procedimento de limpeza do local do molde, recorrendo a acetona, e à aplicação do agente que possibilita a posterior remoção do molde (cerca de seis camadas de cera *TR 104*).

Para a preparação da resina utilizou-se 342.80g de resina *Epikote™* (epóxido, 04908) e 102.84g de endurecedor *Epikure (04908)*, ou seja, 30% do peso da resina *Epikote™* utilizada. Colocaram-se os dois compostos, em recipientes separados, no forno a uma temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , durante algum tempo. Depois, foram misturados num só recipiente e colocados novamente no forno com vácuo (5mbar durante aproximadamente 10 minutos) de forma a desgaseificar e resina. Enquanto este processo decorria preparou-se o local onde se efectuariam o molde. Para tal, procedeu-se à colocação de fita (*Tacky tape*), de modo a limitar e selar a área de moldagem, e à disposição das várias camadas onde se colocaram estrategicamente os sensores, reservando a área do molde mais à esquerda para a obtenção de alguns espécimes (sem qualquer tipo de fibra) que serviram de referência (Figura 3.3).

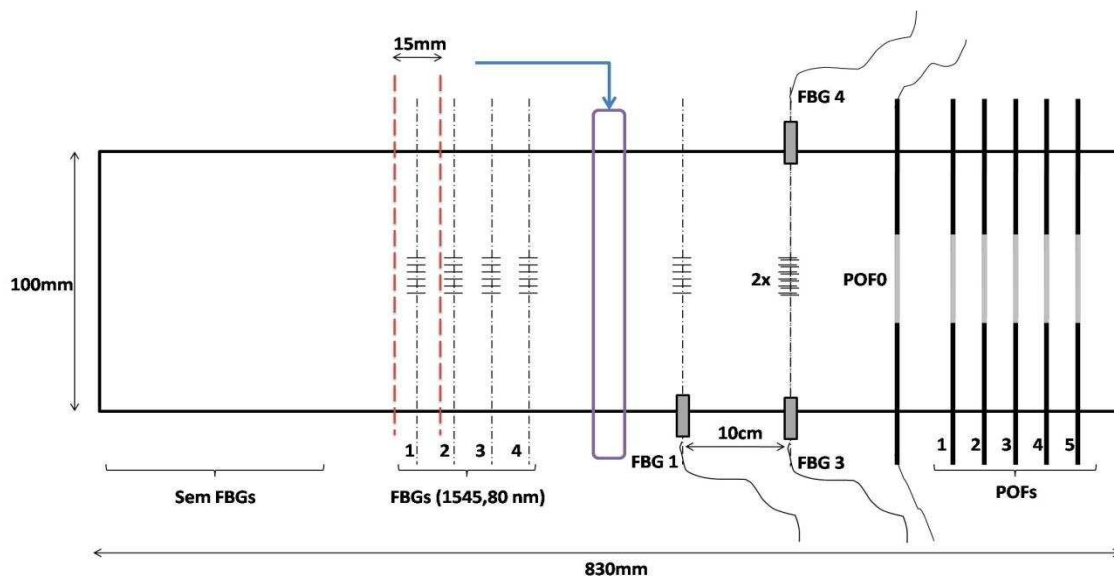


Figura 3.3 – Esquema ilustrativo da disposição dos vários sensores ao longo do compósito multidireccional de carbono.

Entre a segunda e a terceira camadas de tecido de carbono foram dispostas 4 FBGs (gravadas com um comprimento de onda de 1545.80nm), com o objectivo de analisar de que forma a fibra óptica compromete o desempenho mecânico do compósito (são necessárias pelo menos 4 espécimes para tornar fiável a análise), deixando 66mm de distância do tubo por onde é injectada a resina. Do lado direito do referido tubo, entre as mesmas camadas, colocaram-se mais

dois sensores de Bragg, FBG1 (1545.80nm) e FBG4 (1541.00nm), de forma a monitorizar o processo de infusão da resina horizontalmente. Por último, ainda sobre a camada dois colocaram-se as seis POFs (0-5), sendo a monitorização do processo efectuada apenas com uma (POF0). Por fim, entre as camadas 7 e 8 dispôs-se, sobreposto à FBG4, um outro sensor FBG3 (1538.00nm) cuja função é a monitorização da infusão da resina na direcção vertical.

Uma FBG pode ser caracterizada através do seu espectro de reflexão e/ou transmissão. No presente estudo, a caracterização das redes é realizada com recurso ao seu espectro de reflexão. O espectro de reflectividade das redes de Bragg que monitorizaram a cura da resina encontra-se apresentado na Figura 3.4.

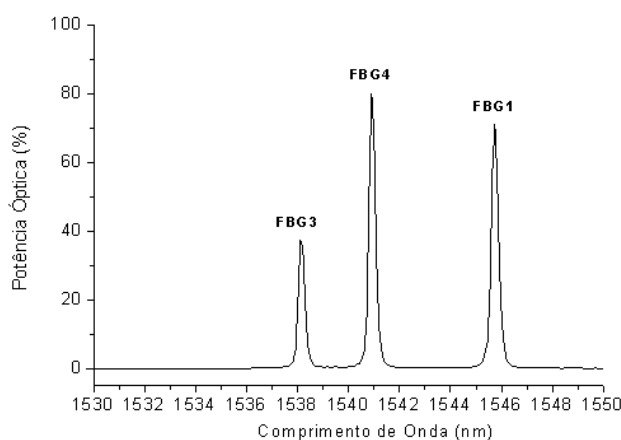


Figura 3.4 – Espectro da potência óptica (reflectividade) referente às redes de Bragg utilizadas na monitorização da cura da resina (FBG1, 3 e 4).

É importante referir que apenas as FBGs a monitorizar foram protegidas com emendas, que foram dispostas sobre a *Tacky tape*, de modo a evitar a quebra da fibra óptica, tal como já foi referido na secção anterior.

Após as camadas estarem devidamente alinhadas, procedeu-se à aplicação do *peel-ply*. Este deverá ser de maiores dimensões que o tecido de carbono para possibilitar a fácil remoção do mesmo após a cura da resina. Sobre esta última camada colocou-se uma folha de *flow mesh* para facilitar a penetração da resina no tecido de carbono à medida que esta preenche a área do molde. De notar que, contrariamente ao *peel-ply*, o *flow mesh* não se estende até à extremidade da malha de carbono, podendo variar de processo para processo consoante a aplicação a que se destina o compósito, deixando uma margem de cerca de 1 ou 2 cm da referida extremidade.



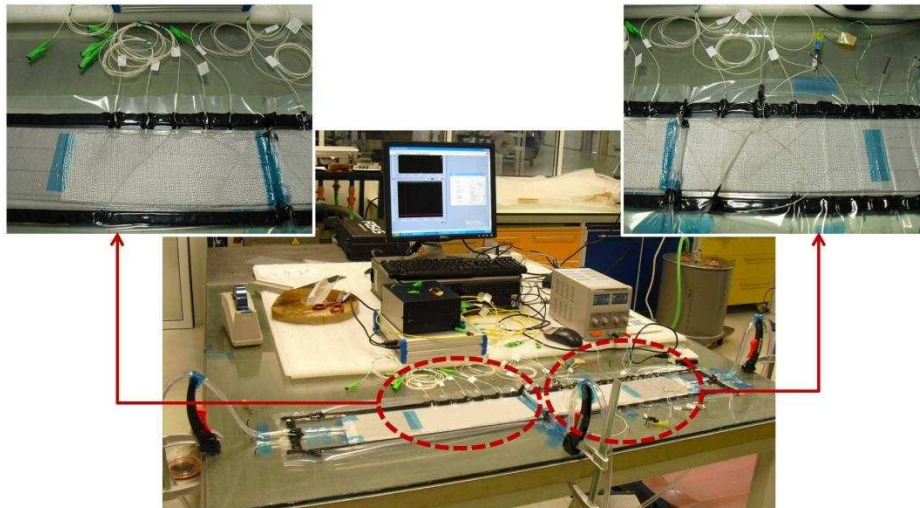


Figura 3.5 – Visualização da montagem do sistema utilizado na monitorização da cura da resina *Epikote™* e pormenor da região contendo os sensores.

Antes de efectuar o vácuo, colocaram-se os tubos de entrada de resina, bem como os tubos pelos quais se efectua o vácuo, e selou-se devidamente a área do molde com uma folha plástica própria para o efeito pressionando-a sobre a *Tacky tape*, de modo a serem evitadas entradas de ar durante a infusão. Iniciou-se então o vácuo, de forma gradual para evitar a ruptura das redes, até se atingir os 20mbar (Figura 3.5). A esta pressão, deu-se início ao processo de infusão da resina e, após esta ocupar toda a área do molde, e assegurando a não existência de fugas, aumentou-se a pressão para 400mbar e aguardou-se pelo terminar do processo da cura da resina. O último passo consistiu em desmoldar o compósito.

## Capítulo 4. Monitorização do compósito polimérico

O sistema óptico utilizado para a monitorização em tempo real com as POFs era composto por um conversor digital-analógico (DAC, acrónimo em inglês de *Digital-to-Analog Converter*, USB-6008) da *National Instruments*, um LED vermelho (IF-E96), um fotodetector (IF-D91), uma fonte de tensão DC da *Kaise* (HY3005D) e um computador com um sistema de aquisição de dados (*LabView™*) que possibilita a observação dos dados, o processamento e a recolha de toda a informação relativa aos sensores em estudo. Para a monitorização das FBGs utilizou-se o interrogador *FBG-Scan 700* da *FOS&S* com o respectivo software e um acoplador 3x1.

### 4.1. Monitorização da cura da resina de epóxido

Ao dar início ao processo de vácuo, deu-se também início à aquisição e armazenamento de dados, obtidos através dos sensores de Bragg e de algumas POFs. De notar que os valores adquiridos pelo *LabView™* para as POFs foram normalizados pela tensão induzida na interface ar-fibra, de forma a facilitar a análise.

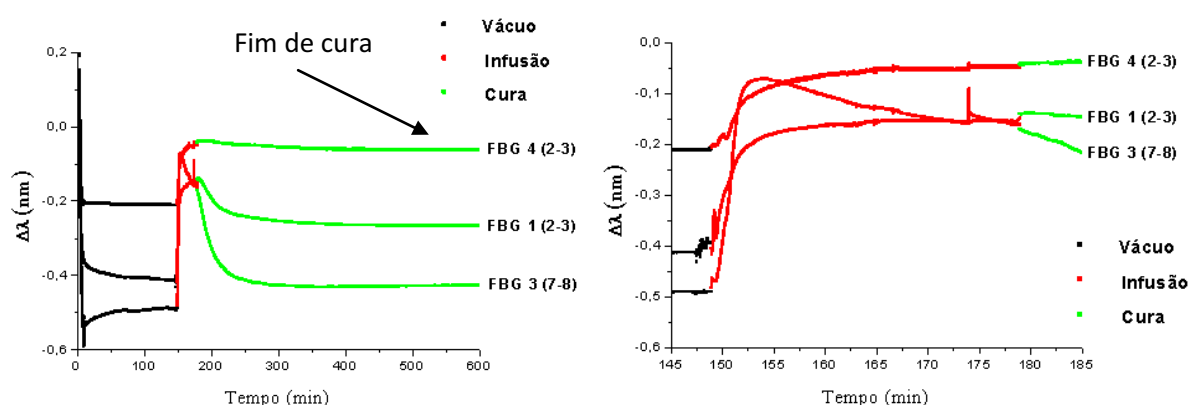


Figura 4.1 – Variação do comprimento de onda das FBGs durante a monitorização do processo de cura da resina *Epikote™* (à esquerda) e ampliação do momento de injeção da resina no molde onde se produzirá o compósito (à direita).

Tal como foi referido anteriormente, ao aplicar uma pressão (vácuo) sobre os sensores de Bragg verifica-se uma quebra na variação de comprimento de onda da FBG, estando esta afirmação de acordo com o que se observa no Figura 4.1 (à esquerda).

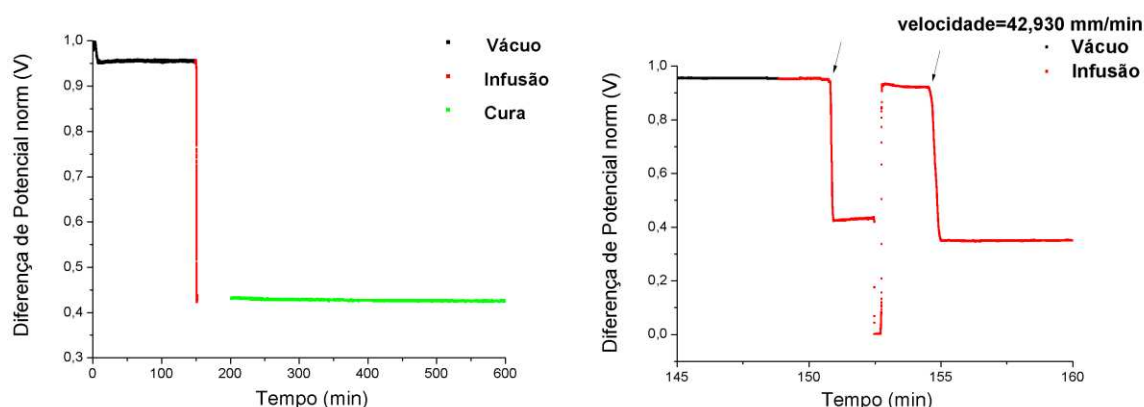
Durante o processo de infusão da resina é notório um crescimento da variação do comprimento de onda, o que pode ser explicado por uma possível expansão da resina. Esta expansão é muito acentuada para a FBG3, como se pode constatar pela subida brusca do comprimento de onda, e pode ser explicada atendendo à temperatura (40 °C) com que a resina sai do forno e é injectada no sistema. O facto de se utilizar o *flow mesh* vai levar a que no processo de infusão a resina apresente uma frente. Deste modo, quando a resina entra no

sistema, esta vai percorrer superficialmente a superfície das camadas e só depois impregna na malha de carbono. A resina chega assim mais rapidamente à FBG3, que se encontra nas camadas superiores, e só depois passa pela FBG1 e pela FBG4, que se encontram entre as camadas 2 e 3.

A diferença de variação de comprimento de onda das FBGs no momento da infusão será uma consequência da localização do sensor na estrutura. Tendo em consideração que a resina é injectada com uma temperatura superior àquela a que se encontram todos os restantes materiais, a resina chega à FBG3 com temperatura superior à das FBGs 1 e 4 pois, estes sensores encontram-se mais próximos da superfície de vidro, sobre a qual foi desenvolvido o molde, e onde vais ocorrendo dissipação de calor nessa região.

De acordo com a informação presente na literatura, os instantes iniciais da cura de um dado material são acompanhados de uma descida de comprimento de onda das FBGs. Tal como é visível, em todas as FBGs se verifica essa diminuição, sendo esta mais acentuada para a FBG3 (fase de contracção), uma vez que foi o sensor que maior subida de comprimento de onda sentiu por causa da temperatura de injeção da resina. Após sensivelmente 5 horas, a variação de comprimento de onda estabiliza, findando o processo de cura da resina *Epikote<sup>TM</sup>*, tal como se pode constatar pela Figura 4.1 (à esquerda).

Um dos objectivos iniciais deste projecto era a determinação da velocidade da frente de resina, recorrendo aos sensores de Bragg, durante o processo de infusão. Para a concretização deste, ter-se-ia que saber o exacto momento no qual a resina passou pelas redes de Bragg 1 e 4, para o cálculo da velocidade horizontalmente, e pelas redes 4 e 3, de modo a obter a velocidade verticalmente. Sabendo a distância entre a FBG1 e FBG4 e considerando uma estimativa da espessura de cada folha de carbono ( $\approx 0.23\text{mm}$ ), através da espessura do espécime ( $2.24\text{mm}$ ), para o caso das FBG3 e 4, seria possível determinar a velocidade que nos possibilitaria complementar a análise referente ao comportamento da resina. Pelos resultados da variação do comprimento de onda em função do tempo, obtidos para as referidas redes, não foi possível determinar graficamente o instante de passagem da resina pelo sensor, não sendo possível concretizar esse estudo. Recorre-se portanto aos sensores em POF para efectuar esse estudo.

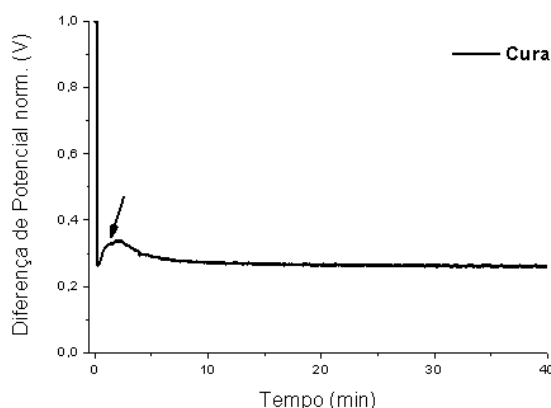


**Figura 4.2 – Variação da diferença de potencial verificada na POF0 desde o instante em que inicia o vácuo até à cura da resina (à esquerda) e representação do intervalo de tempo considerado para a determinação da velocidade de infusão da resina (à direita).**

Analisando os dados adquiridos pela POF0 (Figura 4.2) verifica-se também um decréscimo da potência óptica, embora não muito significativo, sob a forma de diferença de potencial aos terminais do fotodetector, após quatro minutos do momento em que se inicia o vácuo. Quando a resina entra em contacto com o endurecedor, verifica-se uma descida brusca da diferença de potencial aos terminais do fotodetector (cerca de 50%), devendo-se essa diminuição à diferença de índices de refração entre o núcleo da fibra e o meio envolvente (POF com reflectividade baixa). Nesta fase, há um aumento do grau de polimerização, estando presentes cadeias mais densas (índice de refração maior e menor reflectividade). A cura da resina inicia-se imediatamente após a infusão, verificando-se após algum tempo uma estabilidade dos valores da diferença de potencial. Tal indica o findar da variação do índice de refração da resina.

Durante a infusão da resina, procedeu-se à troca da instrumentação da POF0 para a POF4, com o intuito de determinar a velocidade de infusão da resina com recurso à fibra óptica polimérica. Sabendo a distância a que ambas as POFs se encontravam (160mm), e tendo em conta o tempo que a resina durou a passar por estas (indicado por setas no Figura 4.2), foi possível determinar uma velocidade de 42,93 mm/min relativa à impregnação da resina na horizontal.

O facto de se ter procedido à troca da instrumentação das POFs durante a aquisição de dados relativos à cura da resina levou a que não fosse detectado o instante no qual a resina se agrega ao endurecedor. Esta reacção exotérmica reflecte-se numa curva de declive positivo, devido ao estado líquido em que a resina se encontra, estando esse estado associado a um baixo índice de refração (maior reflectividade). Num dos compósitos desenvolvido em estudos prévios, foi possível observar a referida fase, como se pode constatar na Figura 4.3.



**Figura 4.3 – Resposta de uma fibra óptica polimérica, ao longo do tempo de cura da resina, referente ao primeiro compósito que foi desenvolvido durante o presente projecto.**

Considerando os valores de comprimento de onda de início do processo de vácuo para as FBGs 1,3 e 4, bem como os comprimentos de onda finais da cura dos mesmos sensores, foi possível determinar a deformação por tensões residuais ( $\Delta\epsilon$ ), em torno dos respectivos sensores (Tabela 4.1). Para este efeito teve-se em consideração o valor tabelado da sensibilidade à deformação longitudinal ( $1.25\text{pm}/\mu\epsilon$ ) e a equação (2.5) [Nogueira, 2005].

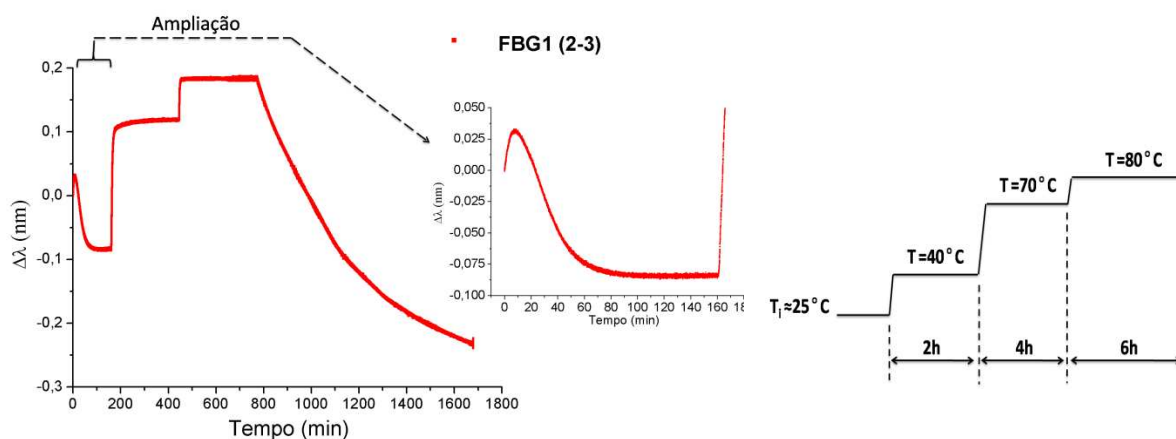
**Tabela 4.1 – Determinação dos valores de deformação por tensão residual (proveniente da contracção da resina) em torno dos sensores de Bragg.**

Sensores	$\lambda_i$ (Vácuo) (nm)	$\lambda_f$ (Cura) (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$\Delta\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ )
FBG 1 (2-3)	1545.33	1545.47	0.14	111.20
FBG 3 (7-8)	1537.66	1537.78	0.12	95.20
FBG 4 (2-3)	1540.71	1540.86	0.15	117.60

É visível que o deslocamento espectral ( $\Delta\lambda$ ) não difere de forma significativa para as FBGs, porém é possível verificar que os valores para a FBG4 e FBG1 se encontram muito próximos, o que seria de esperar visto que se encontram na mesma camada. A FBG3 apresenta o valor mais baixo de tensões residuais, ou seja, o sensor apresenta uma variação menor durante a cura, reflectindo-se num menor valor de elongação relativa ( $\Delta\epsilon$ ). Uma possível justificação para este valor é o facto de a rede de Bragg ter uma maior liberdade no meio envolvente isto é, os sensores que se encontram entre as camadas 2 e 3 encontram-se compreendidos entre uma superfície de vidro, sobre a qual se concretizou o molde e o meio neutro do compósito enquanto que a FBG entre as camadas 7 e 8 está abrangida pelo ar e pelo referido meio. Uma avaliação mais viável parte pela realização de um estudo relativo à espessura do compósito, de forma a analisar a influência da quantidade de resina, em torno do sensor, nos valores de tensão residual.

Uma vez que as tensões residuais podem ser prejudiciais ao desempenho mecânico do compósito poder-se-á efectuar uma pós-cura ao compósito, consistindo num tratamento térmico gradual de forma a libertar algumas dessas tensões, promovendo a qualidade da estrutura final.

De acordo com a informação dos fornecedores da resina, o processo de pós-cura de um sistema reforçado deverá ser efectuado num ciclo de 4 horas a 70 °C e de 6 horas a 80 °C [Hexion]. Deste modo procedeu-se ao tratamento térmico recorrendo a uma câmara climática CH340 da Angelantoni (ACS) e com recurso a um interrogador sm125 da Micron Optics.



**Figura 4.4 – Variação do comprimento de onda do sensor de Bragg, ao longo do tempo, durante o tratamento térmico a que foi sujeito o espécime. À direita encontra-se um diagrama ilustrativo das várias etapas do tratamento pós-cura.**

Analisando a Figura 4.4 é visível, nos primeiros instantes do tratamento, um aumento na variação do comprimento de onda (expansão) devido à subida da temperatura para os 40 °C. Seguidamente, devido ao aumento da temperatura ter favorecido o aumento da eficiência da reacção de polimerização, fazendo reagir a resina e o endurecedor que ainda não tinham sido totalmente polimerizados no processo de cura anteriormente efectuado, verifica-se um decréscimo do comprimento de onda de Bragg.

Comparando o diagrama que descreve os diversos parâmetros considerados para a realização do tratamento pós-cura, Figura 4.4 à direita, é possível observar que o sensor apresenta uma boa resposta à variação da temperatura. No último estágio do processo, após a permanência de 6h a 80 °C no interior da câmara térmica, é possível observar um decréscimo progressivo ilustrando o arrefecimento do espécime após o desligar do equipamento.

Considerando os valores de variação de comprimento de onda registados pela FBG1 para as temperaturas de 25.6 (temperatura a que a câmara térmica se encontrava, quando o espécime foi retirado da mesma), 40.0, 70.0 e 80.0 °C, foi possível determinar a sensibilidade do sensor à variação de temperatura. Realizando um ajuste linear aos valores experimentais, obteve-se então uma sensibilidade de 7.43 pm/°C (Figura 4.5).

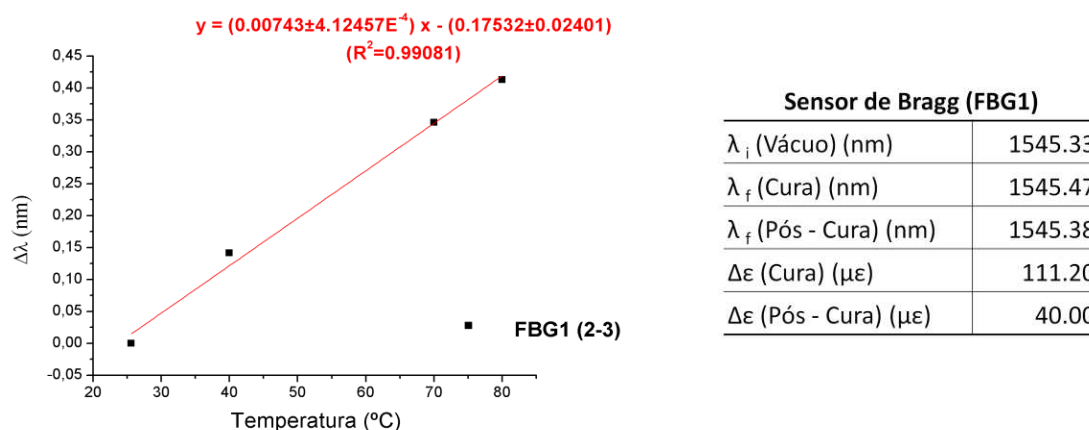


Figura 4.5 – Ajuste linear efectuado aos valores de variação de comprimento de onda, registados pelo sensor de Bragg, em função da temperatura a que o compósito foi submetido. À direita encontram-se apresentados os valores de deformação por tensão residual antes e depois do tratamento térmico efectuado.

Tendo em conta o comprimento de onda final do processo pós-cura, previu-se a deformação por tensões residuais. Comparando o resultado após o tratamento térmico com o da cura efectuado anteriormente, foi possível verificar que houve diminuição de tensões por se verificar uma diminuição de 71.20  $\mu\epsilon$ .

## 4.2. Monitorização dos ensaios mecânicos efectuados sobre o compósito

### 4.2.1 Ensaio de flexão em três pontos

Para a concretização do estudo do comportamento do compósito quando solicitado mecânicamente, recorreu-se ao equipamento da Instron 4505 (H2165) com o qual se realizou um teste de flexão em três pontos (*three-point bending, ASTM D-790*) do espécime de acordo com o procedimento experimental indicado na norma ISO 178. Os espécimes, com dimensões de 2.24x15x100 mm<sup>3</sup> (espessura x largura x comprimento), foram colocados sobre os dois apoios da máquina de ensaios, distanciados entre si de uma distância deliberadamente reduzida (L=80mm), de modo a provocar uma ruptura ao corte interlaminar em detrimento da ruptura à flexão (Figura 4.6).

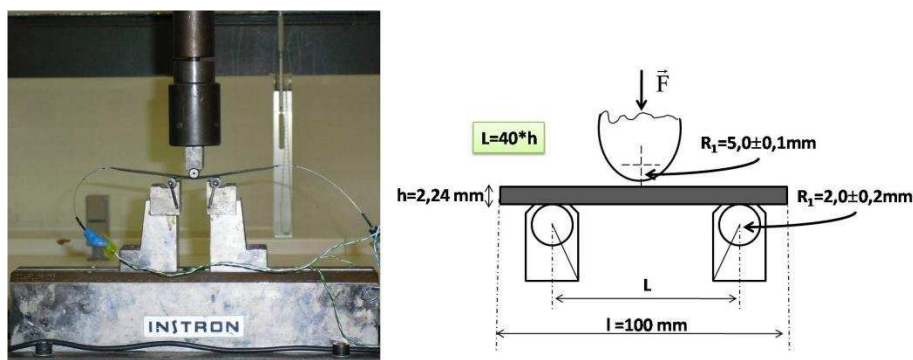


Figura 4.6 – Teste de flexão em três pontos efectuado a um compósito com uma POF embebida (à esquerda) e esquema das medidas consideradas para a concretização do ensaio mecânico (à direita).

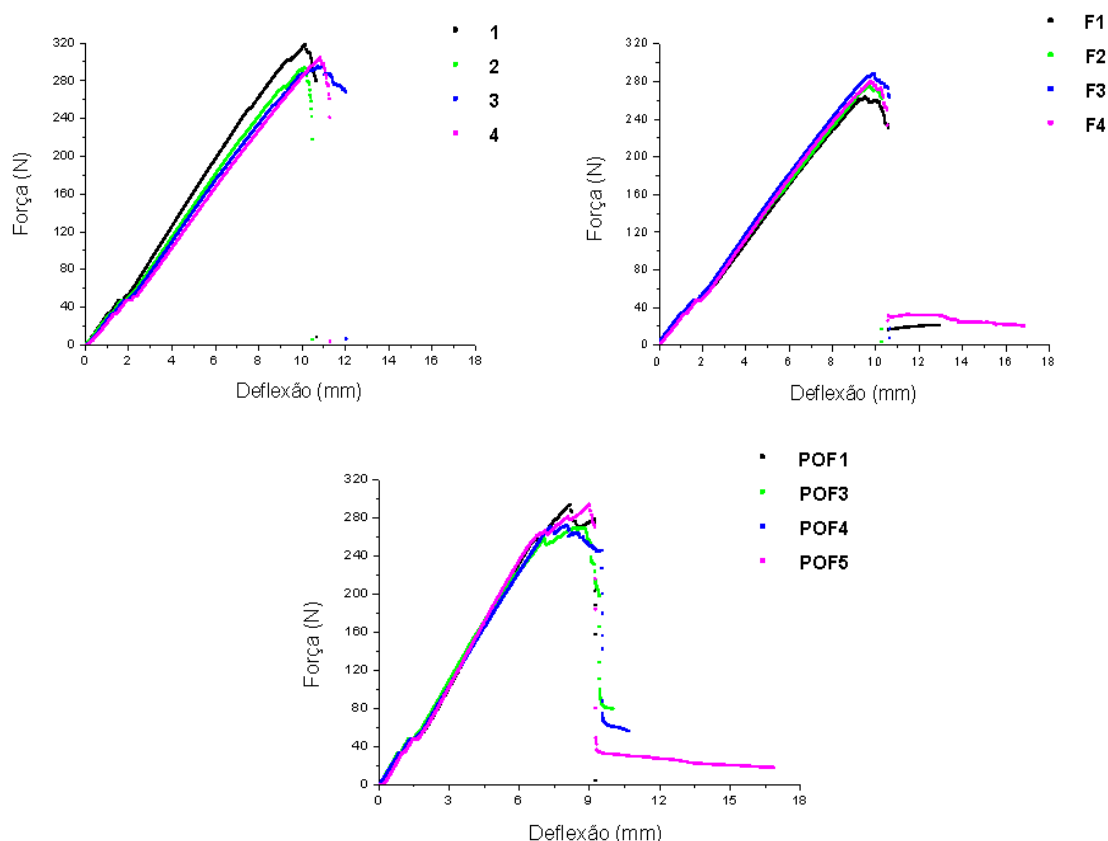
A carga foi aplicada aos espécimes através de uma prensa hidráulica (capacidade máxima de 900N) e os deslocamentos verificados da secção onde é aplicada a carga foram registados através de um computador com uma unidade de aquisição de dados que se encontrava conectado à máquina de ensaios. Limitando o equipamento relativamente ao deslocamento, foram concretizados alguns testes de flexão aos espécimes com uma velocidade de carga, preconizada na norma de ensaio, de 2 ou 5mm/min e a uma frequência de 25Hz.

Cinco espécimes sem fibra, com FBG e com POF foram levados à fractura, utilizando sempre o mesmo método, uma vez que são necessários pelo menos cinco espécimes de cada para averiguar a viabilidade da análise relativa à influência das fibras na resposta mecânica do compósito. Os espécimes foram colocados na máquina de ensaios de modo a que os sensores ficassem na região onde era aplicada a força. Quando sujeito à flexão o espécime é comprimido na região onde é aplicada a força e traccionada na região oposta. A região de tracção, uma vez que o compósito apresenta menor resistência, é mais susceptível à ruptura das camadas de carbono.

O comportamento evidenciado pelos 5 espécimes de cada conjunto, nos instantes iniciais dos ensaios mecânicos (Figura 4.7), foi muito semelhante verificando-se uma certa linearidade dos valores correspondendo ao regime elástico do material. Também pode ser constatada uma similaridade da curvatura que todos os espécimes mostram ao aproximarem-se do instante de fractura, sendo este momento facilmente identificado pelo decréscimo abrupto verificado entre os 9 e os 11mm de deflexão. Esta semelhança que os resultados evidenciam, entre cada conjunto analisado, comprova a boa repetibilidade do processo de fractura para este tipo de espécimes.

Através da análise das representações gráficas presentes na Figura 4.7, é possível constatar que todos os espécimes apresentam um comportamento elástico até à fractura. O regime elástico é graficamente apresentado pela região linear e o plástico pela curvatura que antecede o momento da ruptura. Uma vez que a malha carbono não possui regime plástico, é possível inferir que os valores que apresentam linearidade são referentes à deflexão das camadas de carbono seguindo-se a interveniência das fibras embebidas no compósito.





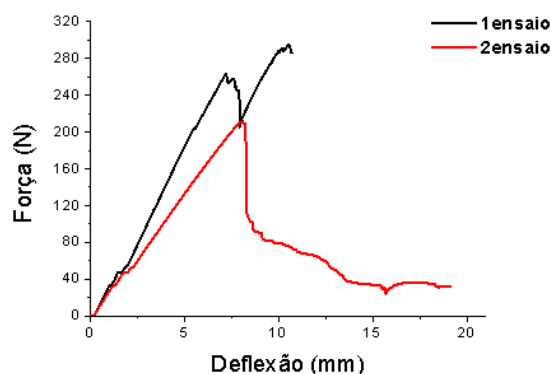
**Figura 4.7 – Força aplicada, durante os ensaios mecânicos, em função da deflexão sofrida pelos espécimes: sem qualquer tipo de fibra embebida (em cima, à esquerda), com FBGs (em cima, à direita); com POFs (em baixo).**

O espécime com a POF3, embora tenha sido levada à ruptura, não efectivou fractura. Uma possível explicação é o facto de o compósito em estudo não ter a capacidade de absorver energia de deformação plástica (não tem praticamente regime plástico) e, quando se incorpora a POF (material polimérico com regime plástico), esta vai conferir uma maior resistência mecânica e flexibilidade ao compósito onde se encontra embebida, por absorver grande parte dessa energia. Esta afirmação é também baseada na largura da curvatura, que se apresenta maior para as fibras ópticas poliméricas.

Relativamente aos espécimes com FBGs incorporadas, as fibras de sílica possuem um regime plástico de cerca de 10 vezes inferior ao das POF, o seu comportamento mecânico é similar ao dos espécimes sem fibras, uma vez que o referido regime é pouco significativo.

Através dos ensaios mecânicos efectuados foi perceptível o comportamento distinto do compósito com POF2 relativamente aos restantes (Figura 4.8), uma vez que no primeiro ensaio, quando o espécime se aproxima do instante de fractura, a força aplicada diminui sendo novamente solicitada mecanicamente. Como é possível constatar, os declives são muito semelhantes, o que revela que é o mesmo material que está a ser solicitado, indicando que este comportamento é devido à fractura parcial de camadas da malha de carbono no interior do

compósito. Como análise complementar, realizou-se um segundo ensaio mecânico ao espécime, considerando os mesmos parâmetros (Figura 4.8).

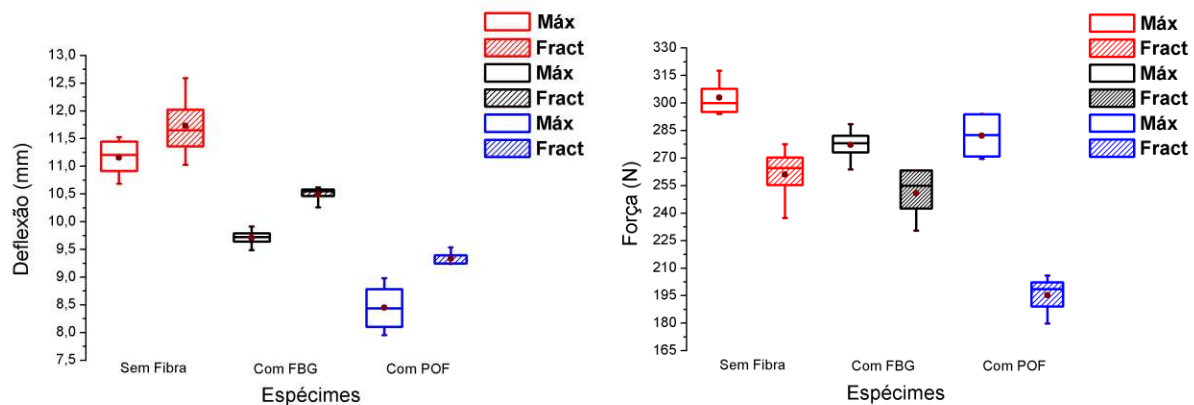


**Figura 4.8 – Deflexão sofrida pelo espécime com a POF2, durante o ciclo de ensaios efectuados ao compósito, aquando da aplicação de uma força mecânica.**

É importante referir que, após o primeiro ensaio, verificou-se uma recuperação bastante significativa da deformação do espécime após a ruptura devido ao facto de não se efectivar fractura. Com a execução do segundo ensaio foi possível apurar um decréscimo da força máxima a que o espécime foi sujeito, bem como um desvio inicial dos valores, traduzindo-se por um declive inferior face ao ensaio antecedente. Com base nesta diminuição é perceptível que a estrutura apresenta-se mecanicamente debilitada após o primeiro ensaio.

Este fenómeno, que apenas se verificou para este espécime nos instantes finais do 1º ensaio, é pouco frequente mas observável, podendo este dever-se a possíveis contaminações, durante a preparação e manuseamento da POF, ou a defeitos presentes no compósito (porosidade, fibras de carbono partidas, ligação deficiente da interface fibra de reforço/matriz). Outra possível explicação é o facto de, durante a flexão, se verificar uma perda da adesão da resina ao material polimérico havendo propagação deste acontecimento à medida que o ensaio decorre.

Com base numa média efectuada aos valores de deflexão e força máximas, bem como aos que foram obtidos no momento em que se efectuou fractura dos espécimes (não considerando os compósitos com comportamentos irregulares) é perceptível que, quando o compósito contém fibras embebidas, estes vão sofrer deflexões menores, sendo a POF a que mais regime plástico confere ao espécime, uma vez que apresenta uma diferença de cerca de 30% entre a força máxima aplicada e a força na fractura, comparativamente à fibra de sílica (9%) (Figura 4.9).



**Figura 4.9 – Influência mecânica das fibras embebidas no compósito durante os ensaios mecânicos relativamente à deflexão sofrida pelo compósito (à esquerda) e à força aplicada sobre este (à direita).**

O compósito constituído apenas pela matriz termoendurecível e pelo reforço de carbono, isto é sem fibras ópticas embebidas, foi o que visivelmente apresentou uma estrutura mais danificada, sendo a propagação da fractura em forma de “V” (Figura 4.10). Ao examinar as fracturas dos compósitos com fibras incorporadas é possível constatar a existência de um dissipador de tensões (a própria fibra óptica), uma vez que não se verifica a propagação da fractura para a região que sofreu compressão.

É ainda visível que a fibra óptica que mais interfere no comportamento mecânico do compósito é a polimérica, como se pode constatar através das fotografias tanto ao espécime fracturado como ao corte efectuado transversalmente ao mesmo. É possível verificar que, quando o espécime com a POF1 embebida é levado à fractura, a fibra confere alguma resistência ao compósito pelo facto de a ruptura apenas se ter propagado até à POF que sustenta em parte o espécime.

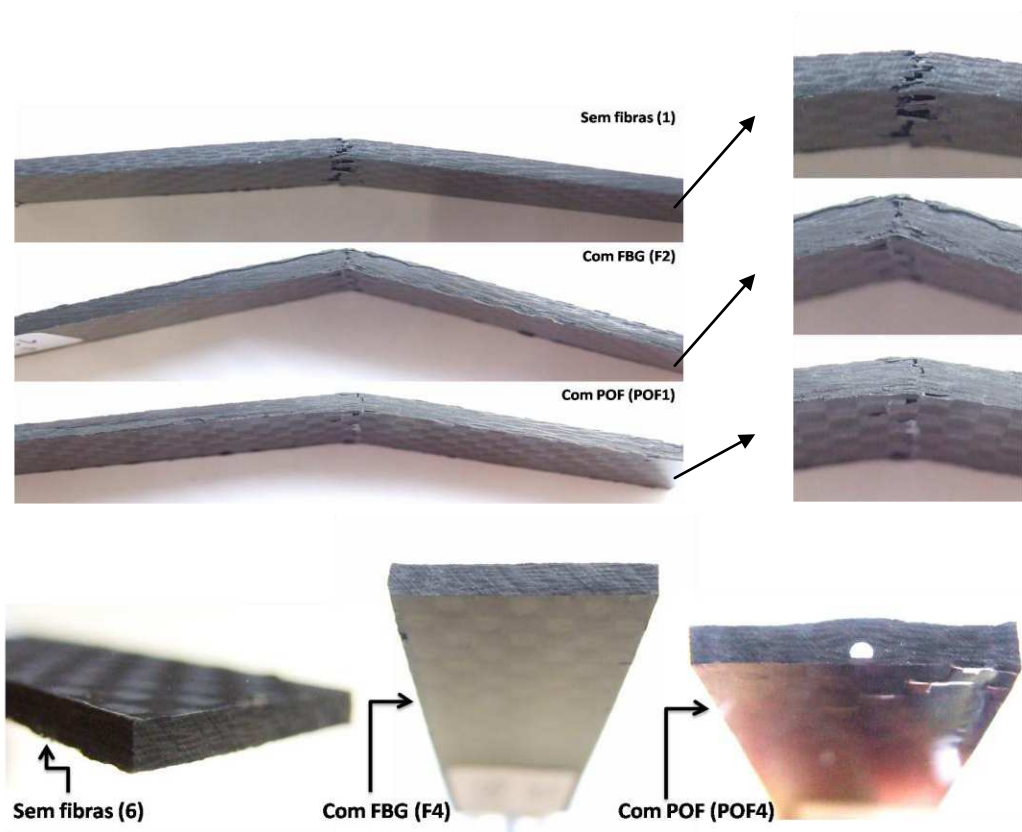


Figura 4.10 – Fotografias do compósito fracturado (em cima), com ampliação da região danificada (em cima, direita) e cortado transversalmente (em baixo).

Por outro lado, embora a fibra polimérica se encontre posicionada mais ou menos na zona neutra (centro do compósito), vai haver um reforço com carbono na parte superior do espécime (zona de tracção onde o compósito inicia fractura). Este aumento local de espessura vai tornar o material mais resistente. Devido às suas dimensões, este tipo de fibra interfere com a matriz final do compósito, sendo observável uma nervura na superfície do espécime na região onde se encontra localizada a fibra, bem como uma deformação interna na disposição da malha de carbono, havendo um excesso de resina na região circundante ao sensor. Nessa zona há então uma maior concentração de defeitos que provoca um aumento de inércia no material. Analisando a disposição das camadas de carbono, é visível que estas não assentam completamente umas nas outras o que pode resultar num ponto de propagação da fractura. É possível adquirir uma melhor percepção do impacto que cada tipo de fibra tem na estrutura efectuando uma integração da área da secção de corte do compósito com a POF embebida, e tendo em conta que o diâmetro da fibra óptica polimérica é de 0.98mm e o da fibra de sílica, pronta a gravar, é de 125  $\mu\text{m}$ . Para um compósito sem fibras embebidas tem-se uma secção de área 33.6  $\text{mm}^2$ , no qual a fibra óptica polimérica apresenta 2.25% da secção de área da estrutura e a fibra de sílica apresenta 0.04% da área total. De salientar que, por a fibra óptica de sílica apresentar um diâmetro muito reduzido,

para esse caso considerou-se uma secção de área de igual valor à de um espécime sem fibras embebidas.

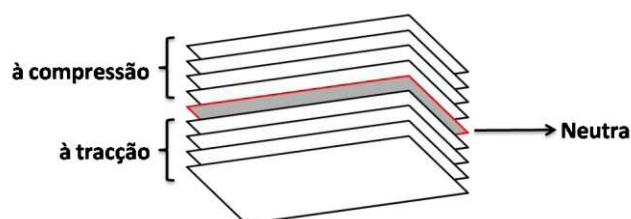
Tal como é possível verificar pelo aspecto da fractura relativa ao compósito com a fibra óptica de sílica, esta não provoca grande impacto na estrutura pois verifica-se o romper das várias camadas do material de reforço (malha de carbono). Esta afirmação é ainda consolidada pelas fotografias do corte lateral, onde não é notória a presença da fibra e não se observam alterações significativas nas camadas de carbono.

O módulo de elasticidade flexural ( $E_f$ ) pode ser obtido por meio da inclinação verificada no regime elástico da deformação. Deste modo, e recorrendo à expressão (2.8), é possível determinar o módulo de elasticidade para cada o caso em estudo, efectuando um ajuste ao declive inicial dos valores de força aplicada em função da deflexão sofrida.

**Tabela 4.2 – Módulo de elasticidade determinado com base no ajuste polinomial efectuado ao declive da recta da força aplicada (N) em função da deflexão sofrida pelo espécime (m).**

Resina de epóxido curada com sistema de reforço	Declive médio obtido pela recta de ajuste ( $m \pm \Delta m$ )	Força máxima média (N) ( $\pm 0.01$ )	Módulo de elasticidade à flexão (GPa)
sem fibras embebidas	30486.88 $\pm$ 40.06	302.93	23.15 $\pm$ 0.94
Com fibra óptica de sílica	29131.36 $\pm$ 41.23	252.22	22.12 $\pm$ 0.90
Com fibra óptica polimérica	38461.17 $\pm$ 70.90	282.25	29.20 $\pm$ 1.19

Quando se efectua um ensaio de flexão, factores como: número de camadas de fibra de carbono, quantidade e densidade da matriz (resina), orientação da malha de reforço, e as próprias condições em que é efectuado o ensaio, definem o valor do módulo de elasticidade para um compósito reforçado com carbono.



**Figura 4.11 – Representação esquemática das camadas da malha de reforço onde se assume que a camada intermédia se encontra posicionada na região neutra do compósito e que as restantes são comprimidas ou traccionadas durante o ensaio de flexão.**

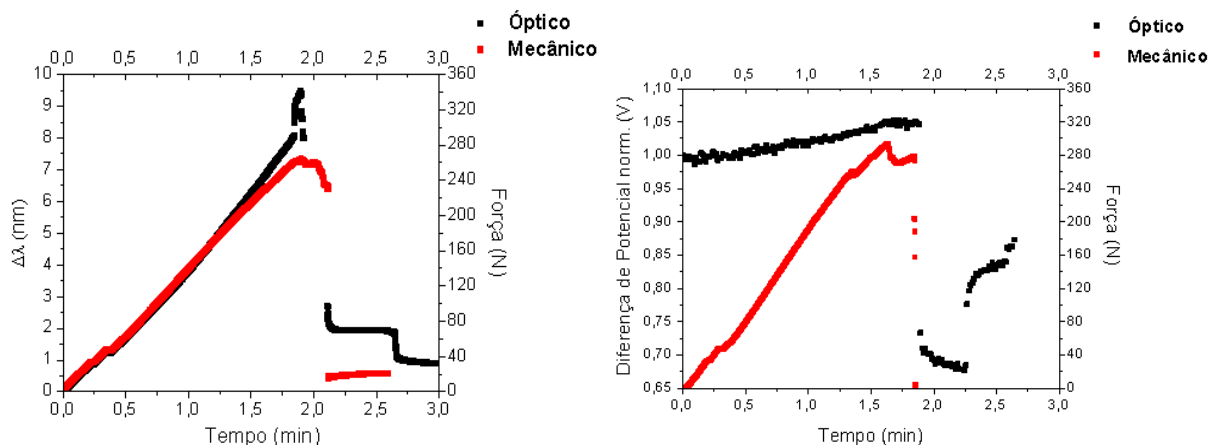
Tendo em consideração o número de camadas (9), a fracção de resina/endurecedor, a fracção de volume da fibra de carbono e o módulo de elasticidade da resina e da fibra utilizadas no desenvolvimento dos espécimes, foi possível estimar um módulo de Young de 51.83 GPa.

Analisando a Tabela 4.2 é possível verificar que os valores obtidos através do ensaio de flexão encontram-se em cerca de 55% abaixo do valor que foi estimado. Este valor teórico foi obtido tendo em consideração o número total de camadas do compósito, o que neste caso não será o mais indicado uma vez que, o facto do compósito ser constituído por número ímpar de folhas de carbono faz com que, idealmente, haja uma folha na região central neutra do espécime, 4 inferiores à tracção e 4 superiores à compressão (Figura 4.11). Considerando ainda que a malha de carbono é mais resistente à compressão do que à tracção, a falha (fractura) irá ocorrer na zona de tracção. Portanto, ao calcular o módulo de Young do mesmo modo que anteriormente mas alterando o número de camadas para 4, obtém-se o valor de 22.62 GPa. Como se pode verificar, este valor difere apenas em 2.34% dos valores experimentais, validando este método.

Factores como a presença de forças de atrito entre os rolos metálicos de apoio e o espécime; eventuais defeitos e irregularidades no alinhamento do compósito antes e/ou durante o ensaio, que favorecem o escorregamento do compósito; ou diferenças na distribuição das camadas de fibras e da resina, que influenciam a espessura do espécime, poderiam ter influência sobre os valores experimentais.

Durante a infusão também se pode verificar uma acumulação da resina nas extremidades do composto e, se isto se comprovar, a matriz irá promover a fragilidade do compósito nessas regiões, favorecendo a ruptura na zona que é traccionada e comprimida. Consequentemente, embora a influência não seja muito significativa, este acumular da resina irá diminuir o módulo de elasticidade do material nos ensaios de flexão.

Quanto maior for o módulo de elasticidade mais rígido é o material sendo necessário aplicar uma força maior para se verificar deflexão, ou seja, menor resistência o material apresenta à ruptura. Tendo em consideração os valores típicos do módulo de Young existentes na literatura para os diversos tipos de fibra, variando entre 65 a 80 GPa [Pigeon, et al., 1992], para o caso da fibra óptica de vidro; e aproximadamente 3GPa [Yang, et al., 2004] para a fibra óptica polimérica, seria então de esperar que os espécimes com POFs embebidas apresentassem menor valor de módulo de elasticidade, mas tal não se verifica. Uma possível explicação para os valores obtidos encontra-se no acumular de resina e malha de carbono na região com maior tendência de ruptura, tal como foi abordado na análise efectuada ao corte transversal.



**Figura 4.12 – Relação entre os resultados ópticos e mecânicos referentes ao espécime F1 com fibra óptica de sílica (à esquerda) e correlação entre os valores da diferença de potencial e força, ao longo do ensaio, relativos ao espécime com a POF 1 incorporada (à direita).**

Tal como se pode constatar pela Figura 4.12, o facto de terem sido embebidas fibras ópticas no compósito permitiu também acompanhar opticamente a solicitação mecânica até à fractura dos espécimes que as continham. Por análise da representação gráfica referente a F1, é perceptível a existência de uma relação linear entre o tempo, a variação do comprimento de onda das redes de Bragg e a força mecânica aplicada sobre o compósito. A variação de comprimento de onda verificada entre 1.8-2.0 min demonstra a tracção que a fibra de sílica sofre próximo do instante de fractura, sustentando mecanicamente a estrutura após a ruptura da malha de carbono.

Na representação gráfica do ensaio efectuado ao compósito com a POF1 é visível uma queda acentuada no momento de fractura e uma pequena oscilação, quando o ensaio mecânico se aproxima do instante de ruptura, para forças aplicadas superiores a 240N. Esta variação advém do facto da POF possuir um módulo de Young diferente do apresentado pelo compósito onde é embebida, o que irá favorecer a fricção ou delaminação (descoesões localizadas) dos dois materiais na proximidade da ruptura.

De modo a analisar não só a resposta mecânica do material compósito, através da resposta óptica dos sensores, mas também a repetibilidade do processo de monitorização, efectuou-se um ciclo de dois e de três ensaios mecânicos aos espécimes, solicitando apenas a região elástica (Figura 4.13).

De notar que, para efectuar um estudo relativo à fadiga do material (processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado), seria necessário aplicar um número alargado de ciclos mecânicos sobre o compósito obtendo assim informação relativa à perda de resistência do material. Tal pode ser remetido para futuras investigações.

Analisando os resultados referentes ao ciclo de ensaios efectuado sobre a POF0, a FBG1, 3 e 4, é observável o mesmo comportamento para a solicitação mecânica em todos os ensaios, demonstrando a boa repetibilidade dos processos de deformação e monitorização. Tal acontecimento era de esperar uma vez que os espécimes encontravam-se em regime elástico (Figura 4.13).

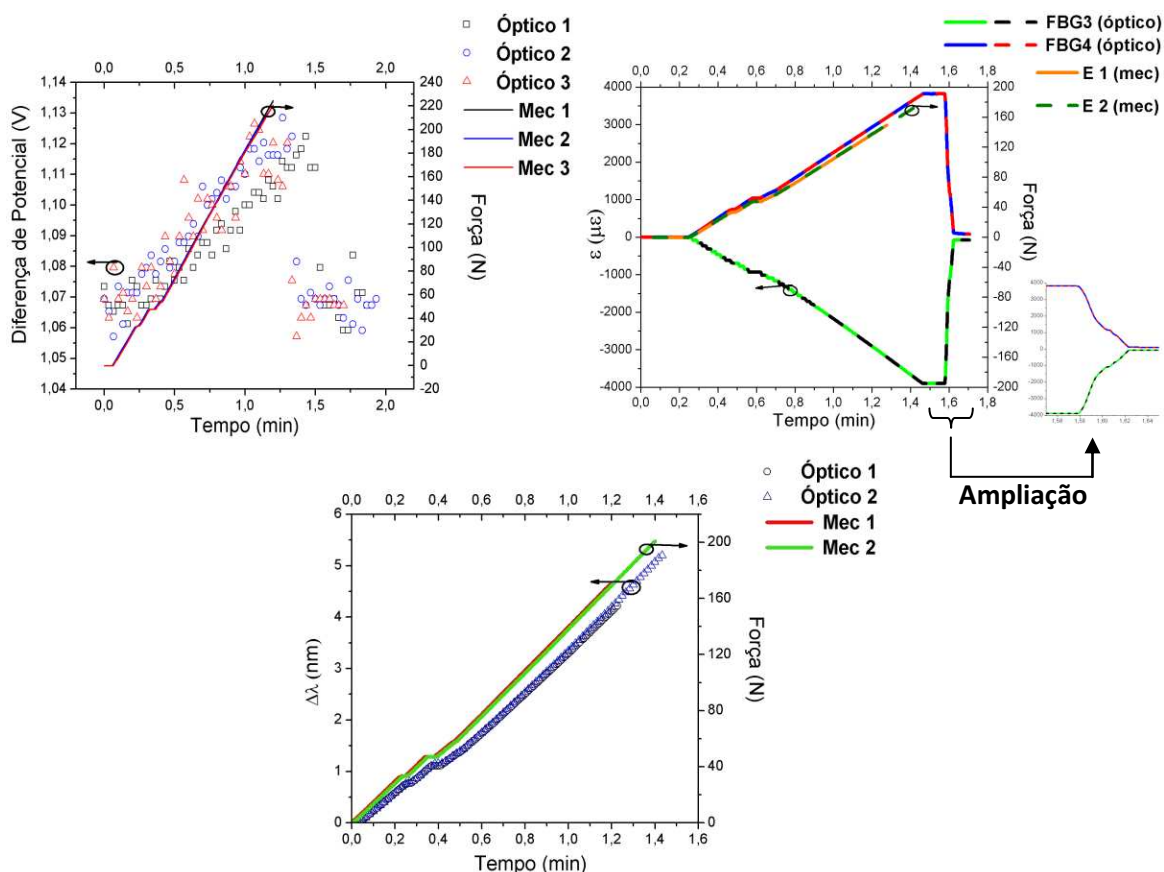


Figura 4.13 – Resultados ópticos e mecânicos referentes ao ciclo de ensaios efectuados aos compósitos com POF0 (em cima, esquerda); FBG3 e 4 (em cima, direita) com ampliação da região de retorno; e FBG1 (em baixo).

Opticamente foi também possível constatar que a POF0 e as FBGs acompanharam devidamente a força mecânica aplicada, mostrando o mesmo comportamento de diferença de potencial e variação de comprimento de onda, respectivamente, no início e no fim do processo (após o retorno). Para o compósito com as duas FBG sobrepostas (FBG3 e FBG4), foi observável uma dada fluência e relaxação típicas do comportamento visco-elástico do material constituinte do espécime (ampliação da fase de retorno presente no Figura 4.13).

O ciclo mecânico do compósito constituído pelos dois sensores (FBG3 e FBG4) foi concretizado após a colocação do espécime na máquina de ensaios com o cuidado de manter o sensor com o menor comprimento de onda (FBG3) mais próximo da região onde é aplicada a força. Este procedimento revela-se necessário tendo em consideração a impossibilidade do

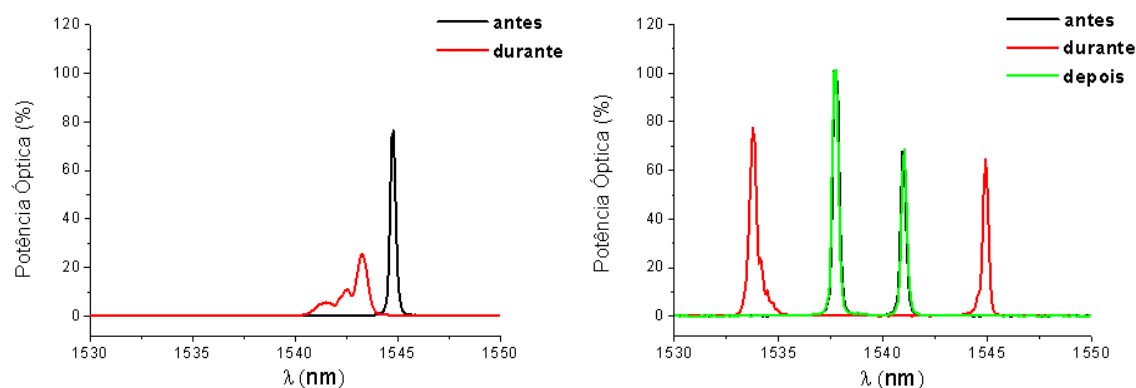


interrogador distinguir, a partir de um dado instante, o sinal de uma das FBGs, pois ambos se interceptariam caso as posições estivessem invertidas.

Deste modo, tal como seria de esperar, há uma rede de Bragg que sofre compressão (FBG3) e outra tracção (FBG4), durante o ensaio de flexão. Uma vez que ambas as FBGs se encontram entre camadas igualmente distanciadas da superfície do espécime, a variação de comprimento de onda na zona de tracção e de compressão são semelhantes, sendo possível depreender que, o campo de tensões a que as camadas se encontram sujeitas é idêntico ao das redes de Bragg constituintes.

Os resultados relativos à monitorização óptica de ciclos de carga são elucidativos quanto à boa recuperação deste tipo de sensores após o primeiro ensaio mecânico. No final dos ensaios efectuados aos espécimes, foi possível constatar uma recuperação completa e rápida da deflexão sofrida pelo compósito.

Através do software associado ao interrogador foi possível registar os espectros relativos aos ensaios mecânicos efectuados nos espécimes contendo a F4, FBG3 e FBG4 (Figura 4.14). Esta análise possibilita a observação da variação do espectro que a rede de Bragg apresenta durante os ensaios a que foram sujeitas.



**Figura 4.14 – Espectros adquiridos antes, durante e depois dos ensaios mecânicos efectuados aos espécimes compostos pela F4 (levado à fractura), à esquerda, e as FBGs 3 e 4, à direita.**

Quando o espécime é sujeito a uma força mecânica e se verifica uma diminuição, face ao valor inicial, do comprimento de onda de Bragg revela que a rede é comprimida (F4 e FBG3) e ao haver um aumento há tracção da rede, tal como acontece com a FBG4. Tanto no espécime que efectivou fractura (F4) como no ensaio efectuado à FBG3 e 4, é visível uma diminuição da potência óptica dos sensores, tal como seria previsto, sendo mais acentuada durante o instante de fractura.

Correlacionando os resultados mecânicos e ópticos, obtidos experimentalmente, é possível obter uma relação directa entre a força aplicada nos ensaios mecânicos e a elongação relativa ao material. Para a concretização desta análise, aplicou-se uma regressão linear aos valores iniciais de força em função do tempo para cada espécime a avaliar, sendo estes dados fornecidos pelo software de análise conectado ao equipamento mecânico, e considerou-se o instante de tempo ( $t_f$ ) para o qual essa relação deixa de ser linear. Depois, através da equação da recta de ajuste é possível adquirir o valor de força mecânica correspondente ao intervalo de tempo de aquisição óptica.

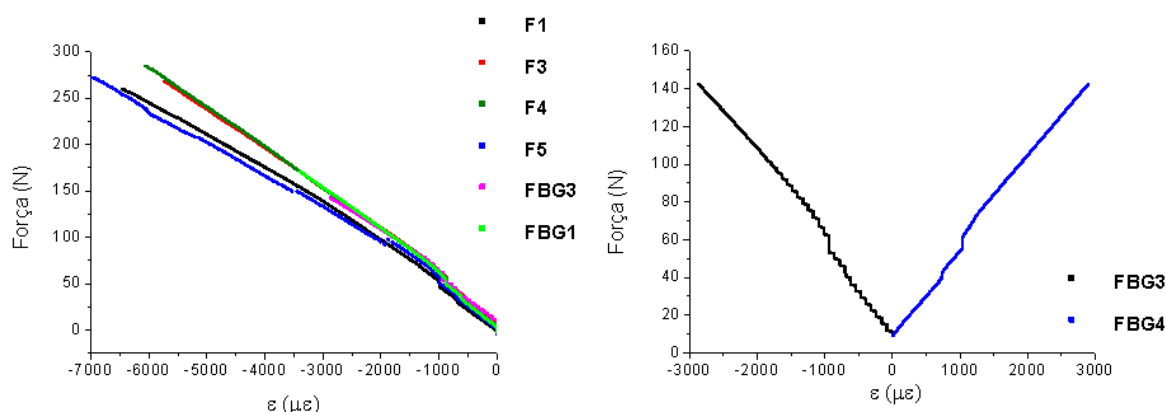


Figura 4.15 – Força mecânica aplicada em função da elongação sofrida pelos espécimes com fibra ópticas de sílica.

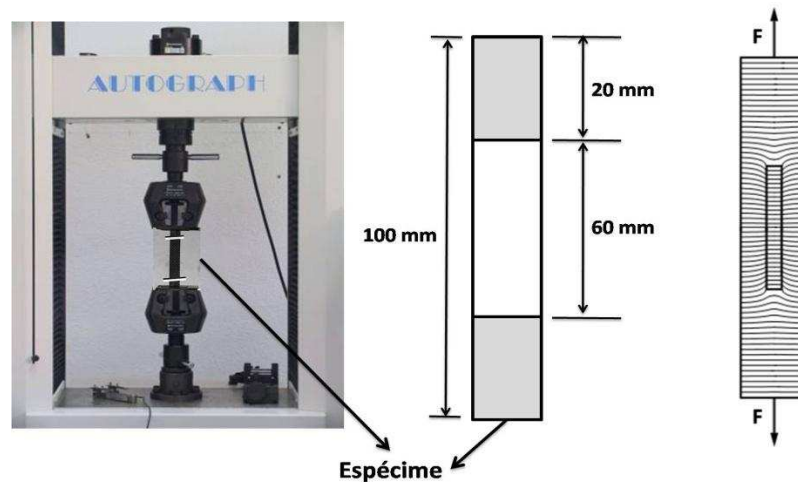
Tal como se pôde constatar anteriormente, estando a FBG3 sujeita a compressão irá ter uma correlação negativa com a força que é aplicada sobre a rede ( $\Delta\epsilon < 0$ ), e a FBG4 que é traccionada apresenta uma correlação positiva (Figura 4.15, à direita). Nos restantes sensores, essa correlação é sempre negativa porque, estando entre as camadas 2 e 3, estão sempre sujeitos a compressão.

Com recurso à relação directa entre a força e a elongação obtida através deste ensaio, é possível monitorizar em tempo real a estrutura permitindo definir janelas de perigo. É importante salientar que as redes de Bragg não partiram mesmo após se ter efectuado a fractura da estrutura compósita, reforçando o potencial destes sensores na monitorização deste tipo de estruturas.

#### 4.2.2 Ensaio de tracção

Num ensaio de tracção, que possibilita medir satisfatoriamente a resistência do material, o espécime a analisar é submetido a um esforço mecânico que tende a alongá-lo até fracturar. Com o intuito de obter uma medida do módulo de Young do material compósito desenvolvido para este trabalho, fixou-se um espécime sem qualquer tipo de fibra óptica embebida, na máquina de ensaios *Autograph AG-50kNG* da *Shimadzu* e, aplicando esforços crescentes na

direção axial do espécime, procedeu-se ao registo das deformações sofridas pelo material através de um vídeo-extensómetro da *Mess-Physik* (Figura 4.16). Através do software apropriado foi possível obter um módulo de Young de 46.23 GPa, para um espécime sem fibras ópticas embebidas.



**Figura 4.16 – Máquina utilizada nos ensaios de tracção e representação das dimensões do espécime consideradas para o efeito, onde as extremidades a sombreado (esquema central) é a região onde as garras da máquina sustentam o compósito. À direita, é possível observar a deformação elástica sofrida na matriz de um espécime, quando este se encontra sujeito a forças mecânicas.**

O valor do módulo de elasticidade obtido através do ensaio de tracção encontra-se bastante próximo do valor que foi inicialmente estimado, a cerca de 10% abaixo do valor, para o compósito utilizado nesta dissertação (51.83 GPa). Tal seria previsto uma vez que, ao contrário do que se verifica nos ensaios de flexão, no ensaio de tracção todas as camadas de fibras de carbono são traccionadas com o mesmo nível de tensão, dependendo unicamente da área da secção transversal do espécime e da carga aplicada pelo equipamento de teste. Deste modo, o ensaio não é tão sensível à forma como são dispostas as camadas e aos parâmetros referidos na análise efectuada ao ensaio de flexão reflectindo-se num valor do módulo de elasticidade próximo do valor teórico estimado.

## Capítulo 5. Conclusões e trabalho futuro

### 5.1. Conclusões

A presente dissertação centrou-se na integração de diferentes sensores em fibra óptica num compósito polimérico, com o objectivo de monitorizar o processo de desenvolvimento do mesmo e avaliar a resposta deste quando sujeito a forças mecânicas. Os resultados apresentados demonstram a viabilidade da integração de sensores de fibra óptica para uma medição eficiente da deformação sofrida pela estrutura, encontrando-se uma relação concordante entre os valores relativos aos ensaios mecânicos e os ópticos que foram adquiridos através do software adequado.

Recorrendo a FBGs e a POFs monitorizou-se o processo de cura da resina de epóxico, vulgarmente utilizada para a obtenção de compósitos de carbono multidireccional que são utilizados em diversas aplicações nomeadamente na indústria da aeronáutica. Foi possível observar as várias etapas do processo de polimerização e, através de uma análise relativa ao deslocamento espectral e aos valores da deformação por tensões residuais, averiguar a influência da disposição dos sensores nas várias camadas na resposta destes. Foi também determinada a velocidade de infusão da resina com recurso à fibra óptica polimérica, demonstrando outra vertente de aplicabilidade deste tipo de sensor. Procedeu-se ainda à realização de um tratamento térmico ao compósito a fim de verificar a atenuação das referidas tensões residuais.

O comportamento dos espécimes à aplicação de uma força mecânica encontra-se dependente de vários factores: processamento da estrutura, quantidade e características dos materiais utilizados para formação da estrutura (resina, fibras), dimensões dos espécimes, entre outros. Estes parâmetros são fulcrais durante o mecanismo de absorção de energia e uma prova desta realidade foi o resultado da determinação da deformação sofrida por tensões residuais em que o espécime com o valor mais baixo foi a que menor elongação relativa sofria, revelando alguma influência da quantidade de resina na qual a rede de Bragg se encontra integrada.

Com os ensaios de caracterização mecânica efectuados em três pontos do compósito foi possível determinar os valores das constantes elásticas e da resistência flexural de um espécime sem qualquer tipo de fibras embebidas e para as situações em que tinham incorporadas fibras ópticas de sílica ou poliméricas. O material apresentou um comportamento elástico-linear até à ruptura, sendo este acontecimento visível em todos os espécimes sujeitos a esta análise, o que indica ser uma característica da estrutura. Foi ainda visível, através de uma média efectuada aos valores de deflexão e força máxima, bem como aos que foram obtidos no instante de fractura, que o facto de terem sido embebidas POFs no compósito, estas proporcionavam uma maior resistência.

Com a realização de ciclos adequados, foi perceptível a repetibilidade do sistema aquando da aplicação de uma força mecânica, sem danos causados aos sensores de Bragg. Foi ainda

observável a recuperação imediata da estrutura, após o retorno da força à posição inicial, realçando a resistência dos materiais que o constituem.

Os valores do módulo de elasticidade à flexão encontraram-se abaixo do valor esperado, uma vez que o ensaio é muito sensível a parâmetros como a dimensão e alinhamento do espécime, orientação da malha de reforço ou até mesmo às condições em ensaio é realizado. Relativamente ao valor do módulo de elasticidade, que foi obtido através do ensaio de tracção, este encontra-se dentro dos valores aceitáveis para esta grandeza, revelando ser um método apropriado por ser um teste que depende essencialmente da área da secção transversal do espécime e da força aplicada pelo equipamento.

Com base no aspecto da fractura dos espécimes, e no corte efectuado transversalmente nestes, é possível inferir que as fibras poliméricas, devido às suas dimensões, são as que mais interferem com a matriz do compósito. Porém, as propriedades plásticas próprias deste tipo de fibra conferiram sustentabilidade mecânica à estrutura quando levada à fractura.

Os sensores de Bragg em fibra óptica, que foram embebidos no compósito polimérico, permaneceram intactos quando o compósito efectuou fractura o que enfatiza o potencial da aplicabilidade deste componente na monitorização de estruturas. Os resultados obtidos revelam-se deste modo promissores para a implementação do sistema desenvolvido na análise de estruturas compósitas.

## 5.2. Trabalho futuro

No seguimento do trabalho efectuado será necessário desenvolver as técnicas utilizadas, de modo a otimizar a monitorização de compósitos poliméricos através de sensores de fibra óptica.

Procedendo à implementação de um sensor de temperatura no interior do compósito, será possível avaliar o comportamento da estrutura durante o seu desenvolvimento, nomeadamente o efeito da temperatura no processo de cura da resina, e implementação numa dada aplicação. Um possível método de desenvolvimento deste sensor é através do método de dupla agulha, que confere imunidade ao sensor de Bragg relativamente à deformação.

No decorrer do trabalho, foram registadas algumas situações anómalas, presumivelmente associadas à interface entre a fibra óptica e o material compósito. Verifica-se então a necessidade de efectuar um estudo mais exaustivo, relativamente ao processo de transferência de esforços na zona da interface fibra óptica/material compósito.

Dentre as potenciais aplicações, a aeronáutica e indústria automóvel poderão ser bastante promissoras.

## Referências Bibliográficas

**André P. S. B.** "Componentes optoelectrónicos para redes fotónicas de alto débito" [Livro]. - Aveiro : Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2002.

**Antunes P. F. C.** "Análise Dinâmica de Estruturas com Sensores de Bragg" [Livro]. - Aveiro : Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.

**AS Light Structures** "Fibre Optic Structural Health Monitoring in Oil Production and Transport" [Artigo] // Business Briefing: Exploration & Production: The Oil and Gas Review. - Norway : Technology & Services, 2003. - Vol. 2.

**Bilro L. [et al.]** "Gait Monitoring with a Wearable Plastic Optical Sensor" [Conferência] // Proc. IEEE Sensors. - Aveiro, Portugal : [s.n.], 2008. - pp. 787-790.

**Bilro L. [et al.]** "Simple and Low-Cost Cure Monitoring System Based on Side-Polished Plastic Optical Fibre" [Artigo] // submitted to Photonics Technology Letters. - Aveiro : IEEE, Dezembro 2009.

**Brown R.** "Handbook of Polymer Testing" [Livro]. - United Kingdom : Rapra Technology Limited, 2002.

**Correia J. R., Branco F. A. e Ferreira J. G.** "Comportamento mecânico de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) e das suas ligações" [Artigo] // Revista Mecânica Experimental. - Lisboa : Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), 2006. - Vol. n.º 12.

**Ferreira L. A. [et al.]** "Redes de Bragg em Fibra Óptica - Contribuições para o Desenvolvimento de uma Tecnologia Revolucionária em Monitorização Estrutural" [Relatório]. - [s.l.] : Encontro Nacional Betão Estrutural, 2004.

**Ferreira L. A. A.** "Interrogação de Sensores de Bragg em Fibra Óptica" [Livro]. - Porto : Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 2000.

**Fortes M. A. e Ferreira P. J.** "Materiais 2000" [Livro]. - Lisboa : IST Press, 2003.

**Ghatak A. e Thyagarajan K.** "Introduction to Fiber Optics" [Livro]. - [s.l.] : Cambridge University Press, 2008.

**González V., Barcia F. L. e Soares B. G.** "Composite Materials Based on Modified Epoxy Resin and Carbon Fiber" [Jornal] // J. Braz. Chem. Soc.. - Brasil : Sociedade Brasileira de Química, 2006. - Vol. 17. - pp. 1117-1123.

**Hexion** "EPIKOTE™ Resin 04908; EPIKURE™ Curing Agent 04908 Datasheet" [Relatório]. - [s.l.] : Hexion Specialty Chemicals.

**Husdi I. R., Nakamura K. e Ueha S.** "Sensing characteristics of plastic optical fibres measured by optical time-domain reflectometry" [Jornal] // Measurement Science and Technology. - Japão : [s.n.], 2004. - Vol. 15. - pp. 1553–1559.

**Kalymnios D. [et al.]** "POF sensors overview" [Conferência] // Proceedings of the 13th International Plastic Optical Fibres Conference. - 2004. - pp. 237–244.

**Klemba F.** "Sensores óticos a fibra aplicados à área de petróleo" [Livro]. - Curitiba : Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2005.

**Kuang K. S. C. [et al.]** "Plastic Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Progress" [Jornal] // Journal of Sensors. - United Kingdom : Hindawi Publishing Corporation, 2009. - pp. 1-13.

**Li B. e Leite A. M. C. S.** Secção de Projecto Mecânico, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa [Online] // ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. - Departamento de Engenharia Mecânica, 2007. - 24 de Novembro de 2009. - [http://www.dem.isel.ipl.pt/seccoes/pagspm/disciplinas/EP/laboratorio/Ensaio\\_de\\_flexao.pdf](http://www.dem.isel.ipl.pt/seccoes/pagspm/disciplinas/EP/laboratorio/Ensaio_de_flexao.pdf).

**Li X.** "Embedded sensors in layered manufacturing" [Livro]. - Stanford, CA : PhD Thesis, Stanford University, 2001.

**Lima A. M. V.** "Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósitos (PRVF)" [Relatório]. - Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.

**Lima H. F. [et al.]** "Structural health monitoring of the church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors" [Relatório]. - Aveiro : [s.n.], 2008.

**Liu R. M. e Liang D. K.** "Experimental study of carbon fiber reinforced plastic with embedded optical fibers" [Jornal] // Materials and Design (Short Communication). - [s.l.] : Elsevier, 2009. - Vol. 31. - pp. 994-998.

**Lomer M. [et al.]** "A quasi-distributed level sensor based on a bent side-polished plastic optical fibre cable" [Relatório]. - [s.l.] : Measurement Science and Technology, 2007. - pp. 2261–2267.

**Marques C. A. F.** "Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica" [Livro]. - Aveiro : Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2008.

**Mastro S. A.** "Optomechanical Behavior of Embedded Fiber Bragg Grating Strain Sensors" [Livro]. - United States : Doctoral Thesis, Drexel University, 2005.

**Moszkowicz V. N.** "Monitoração de Deformações em Dutos Utilizando Sensores a Fibra Óptica com base em Rede de Bragg" [Artigo] // Boletim técnico da PETROBRAS. - 2002. - Vol. 45 (2).

**Nogueira R. N.** "Redes de Bragg em Fibra Óptica" [Livro]. - Aveiro : Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2005.

**Othonos A. e Kalli K.** "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing" [Livro]. - Boston : Artech House, 1999.

**Pereira N. M.** "Monitorização Óptica da Cura do Cimento" [Livro]. - Aveiro : Tese de Licenciatura, Universidade de Aveiro, 2007.

**Pigeon F. [et al.]** "Optical fibre young modulus measurement using an optical method" [Jornal] // Electronics letters. - Saint-Etienne, França : Institution of Electrical Engineers, 1992. - Vol. 28. - pp. 1034-1035.

**Polishuk P.** "Plastic Optical Fibers Branch Out" [Jornal] // IEEE Communications Magazine. - 2006. - pp. 140-148.

**Polishuk P.** "Topics in Design and Implementacion: Plastic Optical Fibers Branch Out" [Relatório]. - [s.l.] : IEEE Communications Magazine, 2006.

**Rao Y. J.** "In-fibre Bragg grating sensors" [Jornal] // Meas. Sci. Technol.. - United Kingdom : IOP Publishing, 1997. - Vol. 8. - pp. 355–375.

**Schukar M. [et al.]** "Integration Technology of POF Sensors into Composites for Structural Health Monitoring" [Conferência] // The 18th International Conference on Plastic Optical Fibers. - Sydney, Australia : Magic Touch Consultancies, 2009.

**Shin C. S. e Chiang C. C.** "Fatigue damage monitoring in polymeric composites using multiple fiber bragg gratings" [Jornal] // International Journal of Fatigue. - Taiwan : Elsevier, 2006. - 28. - pp. 1315–1321.

**Surgeon M. e Wevers M.** "Static and dynamic testing of a quasi-isotropic composite with embedded optical fibres" [Jornal] // Composites: Part A. - [s.l.] : Elsevier Science, 1999. - Vol. 30. - pp. 317–324.



**Takeda S., Okabe Y. e Takeda N.** "Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors" [Jornal] // Composites: Part A. - Tokyo, Japan : Elsevier, 2002. - Vol. 33. - pp. 971–980.

**Toray** "Torayca T300 Technical Data Sheet" [Relatório]. - America : Toray Carbon Fibers America, INC..

**Vieira A. [et al.]** "Effect of the recoating and the length on fiber Bragg grating sensors embedded" [Jornal] // Materials and Design. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - Vol. 30. - pp. 1818–1821.

**Wevers M. [et al.]** "Processing of transient signals from damage in CFRP composite materials monitored with embedded intensity-modulated fiber optic sensors" [Jornal] // NDT&E International . - Belgium : Elsevier, 2006. - Vol. 39. - pp. 229–235.

**Yang D. X. [et al.]** "Structural and mechanical properties of polymeric optical fiber" [Jornal] // Materials Science and Engineering. - Hong Kong, China : Elsevier, 2004. - Vol. A364. - pp. 256–259.

**Yu F. T. S. e Yin S.** "Fiber Optic Sensors" [Livro]. - Pennsylvania : Marcel Dekker, 2002.

**Zubia J. e Arrue J.** "Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications" [Jornal] // Optical Fiber Technology. - Bilbao, Espanha : Academic Press, 2001. - Vol. 7. - pp. 101-140.